

**Vysoká škola báňská – Technická universita**

**Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

Modelování přechodných dějů v asynchronních strojích

Modelling of Transients in Induction Machines

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Walica**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Modelování přechodných dějů v asynchronních strojích**  
**Modelling of Transients in Induction Machines**

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor přechodných dějů v asynchronním stroji
- 2) Tvorba modelu asynchronního stroje pro vyhodnocení přechodných dějů
- 3) Porovnání namodelovaných průběhů s naměřenými
- 4) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Krause, P.; Wasynczuk, O.- Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, IEEE Press 2002
- 3) Boldea, I.; Nasar, S.A.-The Induction Machine Handbook, CRC Press 2001
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina 2008

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 8. května 2015

  
.....

podpis

V této bakalářské práci, bych rád poděkoval především vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavovi Čechovi, Ph.D., Ing. Stanislavovi Rusnokovi a Ing. Pavlovi Sobotovi, kteří mi věnovali čas při měření a samozřejmě za důležité informace a připomínky.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce obsahuje teoretický i praktický pohled na přechodné děje u asynchronních strojů. Zahrnuje základní měření odporů vinutí, naprázdno, nakrátko a momentové charakteristiky, z nichž se vypočítává náhradní schéma pro simulační model. Hlavní část je věnována přechodným dějům. Vybrané přechodné děje jsou změřeny a srovnávány se simulovanými na matematickém modelu v Matlab-Simulink, které slouží nejen pro samotné posouzení těchto dějů, ale rovněž i jako verifikace vytvořeného simulačního modelu.

## **Klíčová slova**

přechodné děje, model asynchronního stroje, Matlab - Simulink, simulace

## **Abstract**

This bachelor work contain teoretical and practical opinion on transients with induction machine. This work includes basic measurement of windings resistance no-load, short-circuit measurement and torque characteristics from witch is calculated replacement scheme for the simulation model. The main part is devoted to transients. These selected transients are measured and compared with simulated on a mathematical model in Matlab – Simulink, witch used not only for the assessment of these processes, but also created simulation model verification.

## **Key words**

transients, induction machine model, Matlab – Simulink, simulation

## Seznam některých použitých symbolů a značek

<i>symbol</i>	<i>název</i>	<i>jednotka</i>
$\cos\varphi_0$	účinník naprázdno	(-)
$\cos\varphi_k$	účinník naprázdno	(-)
$F_{m1}$	magnetomotorická síla statoru	(A)
$F_{m2}$	magnetomotorická síla rotoru	(A)
$F_{m0}$	výsledná magnetomotorická síla	(A)
$f$	frekvence	(Hz)
$f_1$	frekvence statoru	(Hz)
$f_2$	skluzový kmitočet	(Hz)
$I_N$	jmenovitý proud	(A)
$I_1$	proud statoru	(A)
$I_2$	proud rotoru	(A)
$I_0$	proud naprázdno	(A)
$I_k$	proud nakrátko	(A)
$I_{kN}$	jmenovitý proud nakrátko	(A)
$J$	moment setrvačnosti	(kg.m <sup>2</sup> )
$k_{v1}$	činitel statorového vinutí	(-)
$k_{v2}$	činitel rotorového vinutí	(-)
$L$	Indukčnost	(H)
$M_N$	jmenovitý moment	(N.m)
$M_{\max}$	maximální moment	(N.m)

$N_1$	počet závitů v sérii jedné fáze statoru	(-)
$N_2$	počet závitů v sérii jedné fáze statoru	(-)
$n$	otáčky	(min <sup>-1</sup> )
$n_s$	synchronní otáčka	(min <sup>-1</sup> )
$P$	výkon motoru	(W)
$\Delta P_{0N}$	ztrátový výkon naprázdno	(W)
$P_0$	výkon naprázdno	(W)
$p$	počet pólů	(-)
$p'$	převod	(-)
$R$	odpor	(Ω)
$R_s$	odpor fáze statorového vinutí	(Ω)
$s$	skluz	(-)
$t_a$	doba rozběhu	(s)
$T_e$	elektromagnetický moment	(N.m)
$T_{e0}$	elektromagnetický moment naprázdno	(N.m)
$T_{emax}$	elektromagnetický moment zvratu (maximální)	(N.m)
$T_{eN}$	jmenovitý elektromagnetický moment	(N.m)
$T_{eP}$	maximální přechodný elektromagnetický moment	(N.m)
$U$	elektrické napětí	(V)
$U_{i1}$	indukované ideální napětí ve statoru	(V)
$U_{i2}$	indukované ideální napětí v rotru	(V)
$U_N$	jmenovité elektrické napětí	(V)

$U_0$	elektrické napětí naprázdno	(V)
$U_k$	elektrické napětí nakrátko	(V)
$X_\sigma$	rozptylová reaktance	( $\Omega$ )
$\omega$	úhlová rychlost	( $s^{-1}$ )
$\omega_s$	skluzová úhlová rychlost	( $s^{-1}$ )
$\omega_1$	úhlová rychlost točivého pole (synchronní)	( $s^{-1}$ )
$\omega_2$	úhlová rychlost rotoru	( $s^{-1}$ )
$\emptyset$	magnetický tok	(Wb)



# OBSAH

Úvod.....	11
1 Teoretický rozbor .....	12
1.1 Konstrukční provedení .....	12
1.2 Princip .....	12
1.3 Indukované napětí a proud: .....	13
2 Přechodné děje v asynchronních strojích .....	15
2.1 Rozdělení přechodných dějů .....	15
2.1.1 Připojení asynchronního motoru k síti .....	15
2.1.2 Odpojení asynchronního motoru k síti .....	16
3 Analýza asynchronního stroje .....	17
3.1 Měření odporu vinuti .....	17
3.2 Měření naprázdno .....	17
3.3 Měření nakrátko: .....	19
3.4 Momentová charakteristika .....	20
3.5 Náhradní schéma as. motoru .....	21
3.6 Prvky náhradního schématu a jejich výpočet .....	21
4 Simulace přechodných dějů .....	25
4.1 Připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení .....	26
4.1.1 Spouštění při jmenovitém napětí UN .....	26
4.1.2 Spouštění s polovičním jmenovitým napětí UN .....	27
4.1.3 Spouštění při 1,25 UN .....	29
4.2 Připojení asynchronního motoru do sítě do plného zatížení .....	30
4.2.1 Spouštění při jmenovitém napětí UN .....	30
4.2.2 Spouštění při 120 V .....	31
4.3 Vyhodnocení simulace .....	33
4.3.1 Vyhodnocení přechodných dějů připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení .....	33
4.3.2 Vyhodnocení přechodných dějů připojení asynchronního stroje do sítě se zatížením .....	34
4.3.3 Porovnání simulovaných přechodných dějů při stavu naprázdno a v zatížení .....	34
5 Měření přechodných dějů .....	35

5.1	Připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení .....	36
5.1.1	Spouštění při jmenovitém napětí UN .....	36
5.1.2	Spouštění při polovičním jmenovitém napětí UN .....	37
5.1.3	Spouštění při 500V .....	37
5.1.4	Spouštění při jmenovitém napětí UN (ve fázi) .....	38
5.2	Připojení asynchronního motoru do sítě do plného zatížení .....	39
5.2.1	Spouštění při jmenovitém napětí UN .....	39
5.2.2	Spouštění při polovičním jmenovitém napětí UN .....	39
5.2.3	Spouštění při 500V .....	40
5.2.4	Odpojení a znovu připojení k síti .....	40
5.3	Vyhodnocení měření .....	42
5.3.1	Vyhodnocení přechodných dějů připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení .....	42
5.3.2	Vyhodnocení přechodných dějů připojení asynchronního stroje do sítě nezatížením .....	43
5.3.3	Porovnání přechodných dějů při stavu naprázdno a v zatížení .....	43
6	Vyhodnocení přechodných dějů: .....	44
7	Závěr .....	46
	Seznam použité literatury .....	47

## Úvod

Asynchronní stroje jsou elektrické střídavé stroje, které se v průmyslech používají více jak 100 let. Asynchronní stroj v motorickém režimu, což je asynchronní elektromotor se nejčastěji používají kvůli jeho jednoduchosti, poměrně dobré spolehlivosti, nenáročnosti na údržbu a malé pořizovací ceně. Rozsahy výkonů jsou od několika wattů až po několik MW. Proto jsou používány pro pohon nejrůznějších zařízení a to i pro pohony, které vyžadují regulaci. Jako jsou například pračky, kompresory, ventilátory, výtahy, jeřáby, pohony dopravníku apod. Mezi nevýhody asynchronních motorů, patří odběr jalové energie z napájecí sítě, kterou stroje spotřebovávají pro svou činnost. V menší míře se můžeme setkat s asynchronním motorem v generátorickém režimu, což je synchronní generátor například pro malé vodní elektrárny a větrné elektrárny, kde je rovněž použit pro svou jednoduchost. Třetí pracovní oblast asynchronního motoru je indukční brzda, kde se rotor otáčí proti směru točivého magnetického pole rotoru a stroj vytváří brzdicí moment.

Asynchronní stroj pro uvedení do činnosti musíme zapnout a potom také vypnout od elektrické sítě. Toto připojování a odpojování je za příčinou vzniku přechodných dějů v asynchronních strojích i v síti. Další přechodné děje vznikají pro přepínání vinutí Y/D, změna počtu pólů vinutí, změna zatížení nebo při zkratech. Pro návrh stroje a optimální provoz je důležité znát průběh těchto přechodných dějů. Moje bakalářská práce je zaměřena na tyto přechodné děje, která ovšem nebere za cíl probrat komplexní problematiku. Hlavním cílem je zkoumání určitých typu přechodných dějů. Při zkoumání těchto přechodných dějů, využívám matematický model vytvořený v Matlabu a změřené přechodné děje na motoru Siemens.

# 1 Teoretický rozbor

## 1.1 Konstrukční provedení

Konstrukční provedení asynchronního stroje má dvě podstatné části – rotor a stator. Stator, který má uložené vinutí v drážkách a připojené k síti. U rotoru rozeznáváme motory s kotvou nakrátko a s kotvou kroužkovou. Magnetický obvod asynchronního stroje je složen z elektromagnetických ocelových plechů, jejichž tloušťka je obvykle 0,5 mm. Rotor je hladký a je zde rovnoměrná vzduchová mezera. Velikost vzduchové mezery závisí na výkonech. Začátky a konce fáze jsou připojeny ke svorkovnici a vinutí může být spojeno do hvězdy nebo trojúhelníků.

## 1.2 Princip

Princip asynchronních strojů je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudu, které vyvolá na rotoru točivé magnetické pole. Velikost vzduchové mezery mezi rotorem a statorem musí být co nejmenší, aby magnetická vazba byla co nejlepší.

Asynchronní stroje mají stejnou magnetickou vazbu mezi vstupním (na rotoru) a výstupním vinutím (na statoru) jako u transformátorů, ale rozdíl je v tom, že výstupní vinutí stroje se otáčí a jeho vodiče se pohybují v magnetickém poli.

Když protéká statorovým vinutím proud  $I_1$ , vznikne magnetomotorická síla, kterou si můžeme představit jako vektor  $F_{m1}$ , který se otáčí úhlovou rychlostí

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \frac{1}{p} \quad (1.1)$$

rotor se také otáčí ve stejném smyslu úhlovou rychlostí

$$\omega_1 = \omega_2(1 - s) \quad (1.2)$$

kde skluz  $s$  je závislý na poklesu otáček

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad (1.3)$$

a synchronní otáčky

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (1.4)$$

v rotoru se indukují napětí o kmitočtu

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (1.5)$$

rotorovými vinutím protékají proudy, které vytvoří magnetomotorické sílu rotoru. Tuto sílu si lze představit jako vektor  $F_{m2}$ , který se otáčí vůči rotoru rychlostí

$$\omega_s = s \cdot \omega_1 \quad (1.6)$$

protože se rotor otáčí ve stejném smyslu úhlovou rychlostí  $\omega$  bude výsledná rychlost magnetomotorické síly  $F_{m2}$  vůči statoru rovna.

$$\omega_2 + \omega_s = \omega_1 \cdot (1 - s) + s \cdot \omega_1 = \omega_1 \quad (1.7)$$

Vektory magnetomotorické síly  $F_{m1}$  i rotoru  $F_{m2}$  se při jakémkoliv skluzu budou otáčet ve stejném smyslu s konstantní úhlovou rychlostí  $\omega_1$ . Když tyto síly sečteme, získáme výslednou magnetomotorickou sílu.

$$F_{m0} = F_{m1} + F_{m2} \quad (1.8)$$

Tahle výsledná magnetomotorická síla nám budí točivé magnetické pole.

### 1.3 Indukované napětí a proud:

Ze zákona fyziky indukčního stroje je patrné, že velikost napětí a proudu na rotoru bude závislé na skluzu. Dle základní rovnice střídavého stroje

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot k_v \cdot \emptyset \quad (1.9)$$

ideální napětí ve statoru

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \emptyset \quad (1.10)$$

a ideální napětí na rotoru, který stojí a má rotorové vinutí rozpojeno

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \emptyset \quad (1.11)$$

V případě stojícího rotoru  $f_2 = f_1$ . Maximální rotorové napětí je ve stavu brždění protiproudem. Další krajní případ nastává v případě ideálního chodu naprázdno, to znamená, když se rotor točí synchronními otáčkami, tedy  $n = n_1$  a  $s = 0$  i  $f_2 = 0$ . V takovém případě se rotorové napětí rovná nule. Rotorové napětí s libovolnými otáčkami je pak

$$U_{i2} = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \Phi \quad (1.12)$$

tedy

$$U_2 = s \cdot U_{i2} = s \cdot U_{20} \quad (1.13)$$

kde  $U_{20}$  se nazývá napětí naprázdno  
a pak můžeme definovat převod

$$p' = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \quad (1.14)$$

tedy

$$U_{i2} = p' \cdot U_{i2} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \Phi = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \Phi = U_{i1} \quad (1.15)$$

indukovaným napětím se vytvoří proud v rotoru

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + (2\pi \cdot f_2 \cdot L_2)^2}} = \frac{s \cdot U_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}} \quad (1.16)$$

po úpravě rovnice dostaneme

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (1.17)$$

Z rovnice jde vidět, že asynchronní stroj se chová jako transformátor při všech otáčkách a je na sekundární straně zatížen odporem  $\frac{R_2}{s}$ .

## 2 Přechodné děje v asynchronních strojích

Přechází-li obvod z jednoho ustáleného stavu do jiného ustáleného stavu, nastává přechodný děj. Je to například zapínání a vypínání elektrického stroje, přičemž ustáleným provozním stavem je v tom to případě zapnutý, či vypnutý elektrický stroj.

### 2.1 Rozdělení přechodných dějů

V asynchronních strojích můžeme provést rozdělení do následujících dvou kategorií z hlediska doby trvání přechodných dějů:

- **Elektromagnetické přechodné děje** – doba trvání je řádově v desetínách sekundy
- **Elektromechanické přechodné děje** – doba trvání se mění v širokých mezích, řádově od desetin sekundy až po desítky sekund

Při každé změně provozních podmínek vznikají přechodné děje v asynchronních strojích. Tedy při všech rychlých změnách zatížení a také při připojení stroje k síti nebo při jeho odpojení, dále při přepínání vinutí Y/D, přepínání počtu pólů vinutí, reverzaci a zkratech na svorkách stroje či v síti. Nejvýznamnější přechodné děje vznikají při připojování stroje k síti a odpojování stroje od sítě. Vzhledem k typu asynchronního elektromotoru, který je použit pro zkoumání přechodných dějů v rámci této práce, přicházejí do úvahy následující přechodné děje.

#### 2.1.1 Připojení asynchronního motoru k síti

V okamžiku, kdy se připne motor na síť, chová se podobně jako transformátor nakrátko. V tomto okamžiku nastane protékání záběrného proudu motorem omezeným při daném napětí výhradně impedancí motoru nakrátko. Rozběh motoru je provázen proudovými a momentovými rázy.

Přechodné jevy jsou značně tlumené a na dobu jejich trvání má značný vliv moment setrvačnosti stroje  $J$ .

Podle vztahu (2.1) je možné určit krajní velikost přechodného momentu, který může zakmitnout při připnutí stroje na síť [4]

$$M_p = M_z \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos\varphi_k}\right) \quad (2.1)$$

Připojíme-li stroj na síť, záleží, zda se jedná o tzv. tvrdý či tzv. měkký zdroj. Při napájení měkkého zdroje (například z transformátoru) dochází v okamžiku zapnutí stroje k úbytku napětí na svorkách zdroje, což je provázeno nejen poklesem momentu, ale i většími záškuby na průběhu proudu a momentu i delší dobou trvání přechodných dějů.

Tzv. normální doba rozběhu je definována jako celková doba rozběhu motoru, pomocí které je možné posuzovat chování stroje při elektromechanických přechodných dějích. Je to doba, za kterou by se uvažovaný stroj rozběhl, z nulové rychlosti na svou jmenovitou rychlost, kdyby byl rozbíhán svým jmenovitým momentem a zatěžovací moment by byl nulový. Podle [10] platí:

$$t_a = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{M_N} \quad (2.2)$$

### 2.1.2 Odpojení asynchronního motoru k síti

Přechodný děj, který vzniká při odpojení asynchronního motoru od sítě, je vyvolán postupným úbytkem magnetické energie motoru. Magnetický tok se postupně při odpojení zmenšuje, jelikož brání jeho změně proudy, které vznikají při tomto ději v rotoru. Rychlost tohoto zmenšování magnetického toku je daná časovými konstantami rotorových obvodů. Proudové vinutí rotoru se po odpojení elektromotoru postupně aperiodicky zmenšují.



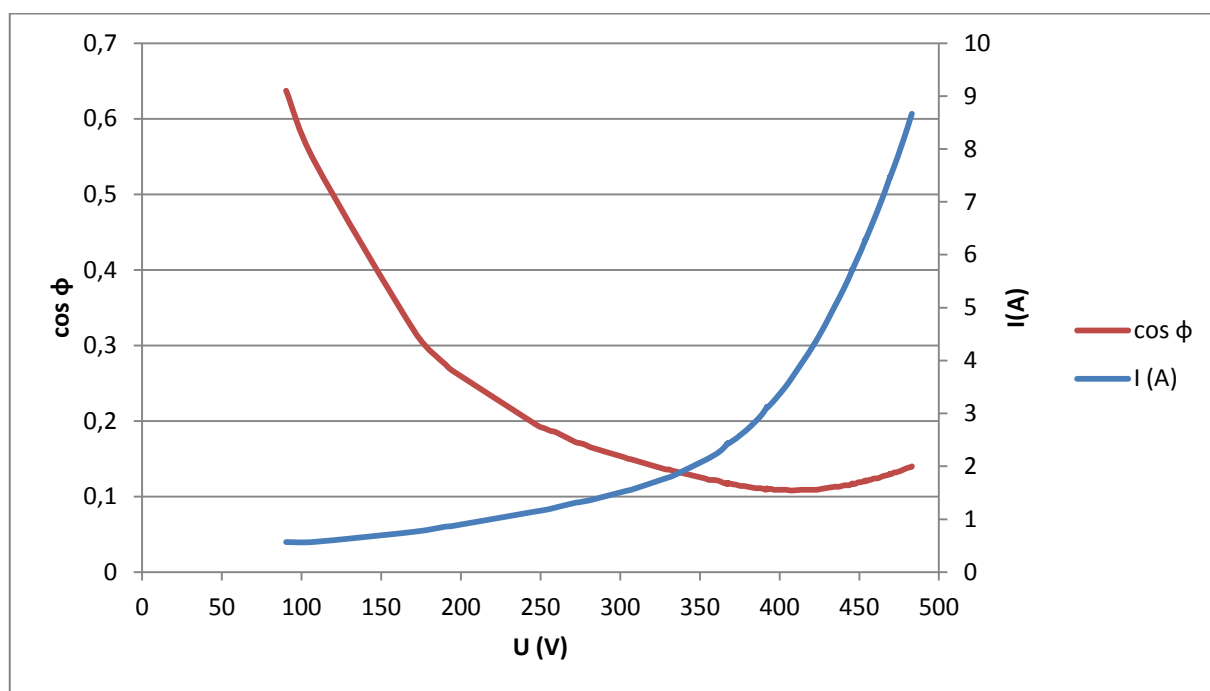
### 3 Analýza asynchronního stroje

#### 3.1 Měření odporu vinutí

Měření odporů statorového vinutí je důležité pro náhradní schéma as. motoru. Měření se provádí nepřímou metodou odečítání proudu a napětí. Zapojení stroje bylo YY. Výsledný odpor je pak aritmetický průměr všech tří odporů.  $R_s = 3,35\Omega$

#### 3.2 Měření naprázdno

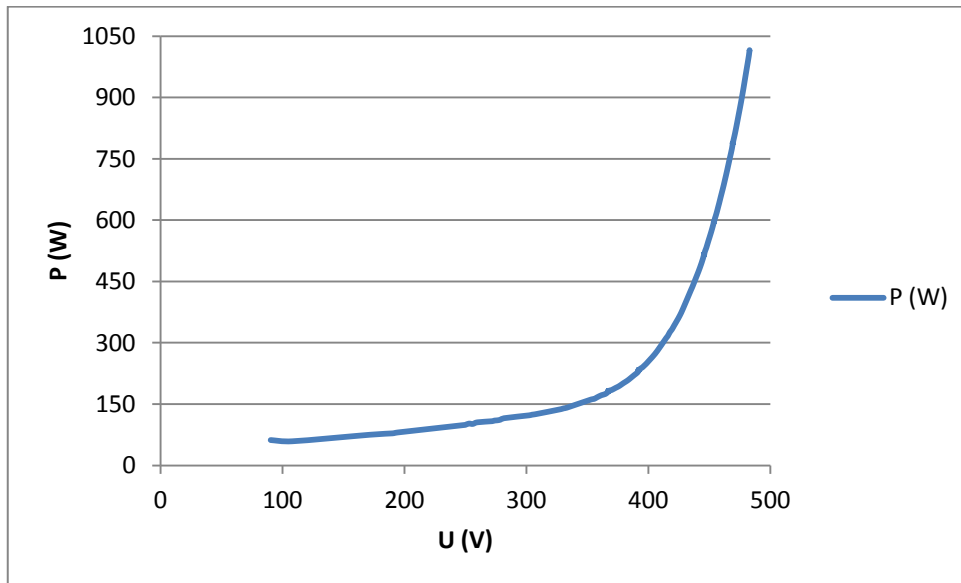
Hlavním účelem měření naprázdno je zjistit proud naprázdno  $I_{ON}$ , účinník naprázdno  $\cos\phi_{0N}$  a určit prvky příčné větve náhradního schématu asynchronního motoru  $X_\mu$  a  $R_{Fe}$ . Ve stavu naprázdno se hřídel motoru točí volně, k motoru není připojena zátěž a točí se skoro synchronními otáčkami. Při měření naprázdno je stator napájen souměrným regulovatelným napětím se stálým kmitočtem. Před měřením se určitou dobu zaběhává, aby se ustálili ztráty v ložiskách. Po rozběhnutí odebírá motor ze sítě jen malý příkon  $P_0$ .



Obr 3.1 Charakteristika stroje naprázdno

Tab 3.1 Hodnoty naprázdno

$U_0$ (V)	$I_{0N}$	$\cos\varphi_{0N}$ (-)
400	3,365	0,109



Obr 3.2 Charakteristika stroje naprázdno, průběh příkonu stroje

Tab 3.2 Ztrát na pokrytí spotřeby

$\Delta P_{0N}$ (W)
58

Z naměřených hodnot proudu naprázdno  $I_{0N}$  a účinitků naprázdno  $\cos\varphi_{0N}$  při jmenovitém napětí, je nutné určit velikost magnetizačního proudu  $I_\mu$ , který tvoří jalovou složku.

$$I_\mu = I_{0N} \sin\varphi_{0N} = 3,365 \cdot 0,994 = 3,345 \text{ A} \quad (3.1)$$

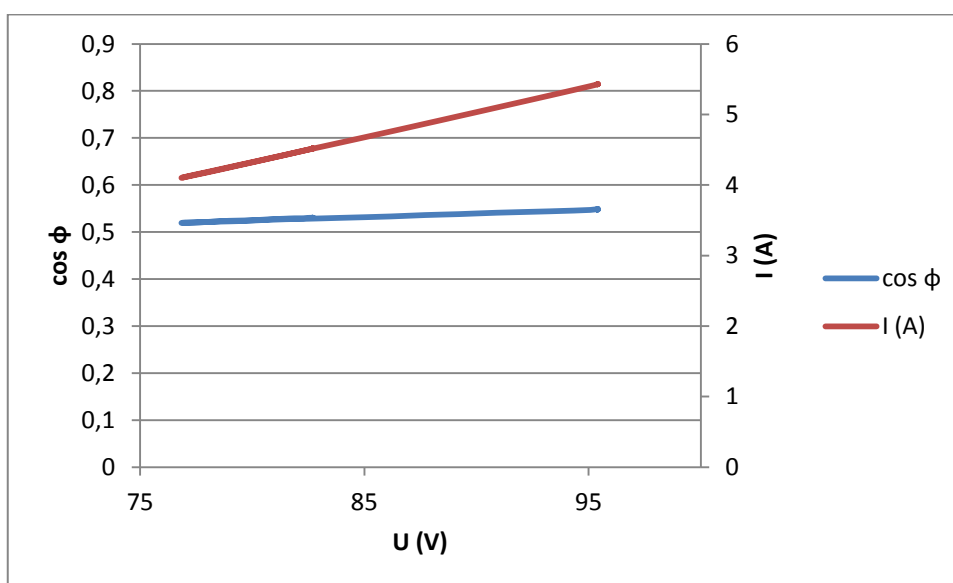
$$\sin\varphi_{0N} = \sqrt{1 - \cos\varphi_{0N}^2} = \sqrt{1 - 0,109^2} = 0,994 \quad (3.2)$$

moment pro pokrytí vlastních ztrát ve stavu naprázdno

$$M_{ztrát} = \frac{\Delta P_{0N}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{58}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60}} = 0,369 \text{ Nm} \quad (3.3)$$

### 3.3 Měření nakrátko:

Účelem měření nakrátko je zjistit proud nakrátko  $I_k$ , účinník nakrátko  $\cos\varphi_k$  a prvky náhradního schématu  $R_s$  a  $X_s$ . Ve stavu nakrátko se rotor motoru netočí, ale je zablokován (obvykle zabrzděným dynamometrem). Při měření nakrátko se neodebírá ani nedodává žádnou mechanickou energii a celý příkon odebírány ze sítě se spotřebuje na krytí ztrát, které se v stroji přemění na teplo. Měření nakrátko je náročné tím, že při připojení jmenovitého napětí  $U_N$  na svorky motoru teče jeho vinutím několika násobný proud oproti jmenovitému proudu  $I_N$ . Celá energie dodávána motoru se mění v teplo, které velmi rychle zvyšuje teplotu statorového i rotorového vinutí, což představuje nebezpečí zničení stroje. Proto se měření nakrátko provádí při sníženém napětí, aby proud nakrátko  $I_k$  nepřesáhnul proud jmenovitý  $I_N$ .



Obr 3.3 Charakteristika stroje nakrátko

Tab 3.3 Hodnoty nakrátko

$U_k$ (V)	$I_k$	$\cos\varphi_k$ (-)
87,71	4,9	0,536

Z naměřených hodnot  $I_k$  a  $U_k$  je nutné určit hodnotu jmenovitého proudu nakrátko  $I_{kN}$ .

$$I_{kN} = I_k \frac{U_N}{U_k} = 4,9 \frac{400}{87,71} = 22,346 \text{ A} \quad (3.4)$$

dále se počítá celkový činný odpor  $R_k$

$$R_k = \frac{U_{sfN} \cdot \cos \varphi_k}{I_{kN}} = \frac{231 \cdot 0,536}{22,346} = 5,54 \, \Omega \quad (3.5)$$

odpor rotorového vinutí přepočítaný na stator

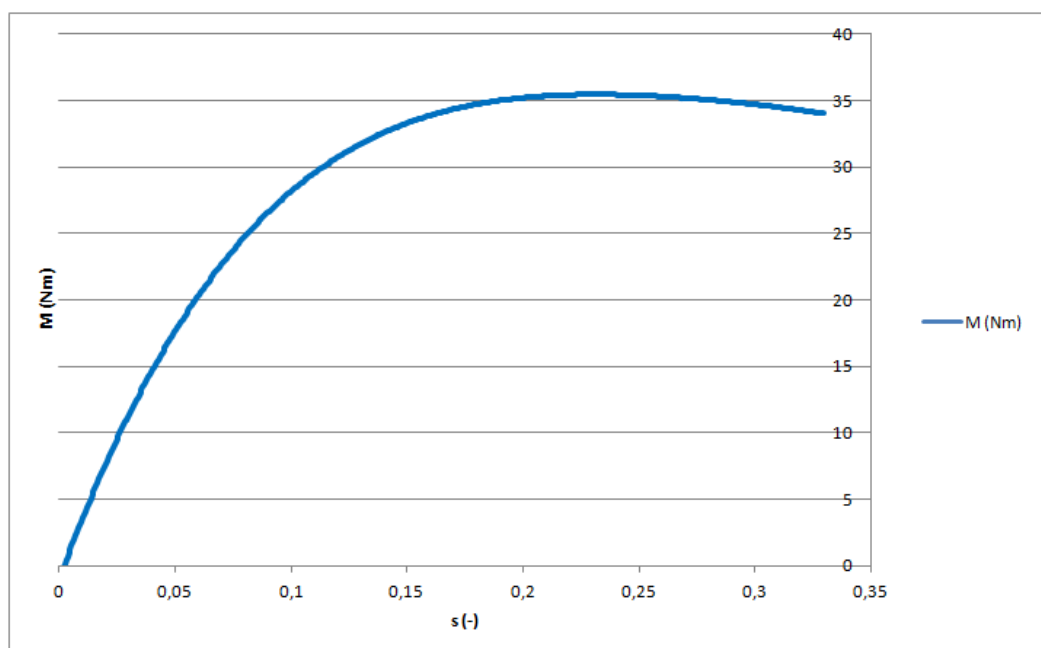
$$R'_r = R_k - R_s = 5,54 - 3,35 = 1,1 \, \Omega \quad (3.6)$$

### 3.4 Momentová charakteristika

Hlavním účelem měření momentové charakteristiky je, abych mohl vyjádřit závislosti momentu motoru  $M$  na skluzu  $s$  (nebo na otáčkách  $n$ ). Měření provádím při sníženém napětí  $U' = 0,5U_N$ . Toto napětí  $U'$  udržujeme konstantní. Dynamometrem motor zatížím téměř do stavu nakrátko (kdy se rotor točí velmi pomalu) a postupně motor odlehčuji. Pro každou nastavenou hodnotu otáček  $n$  odečítáme velikost momentu  $M'$ .

$$M = M' \cdot \left( \frac{U_N}{U'} \right)^2 \quad (3.7)$$

Momentovou charakteristiku jsem neproměřil celou z důvodu velkého proudu. Z momentové charakteristiky jsem zjistil maximální moment  $M_{\max}$

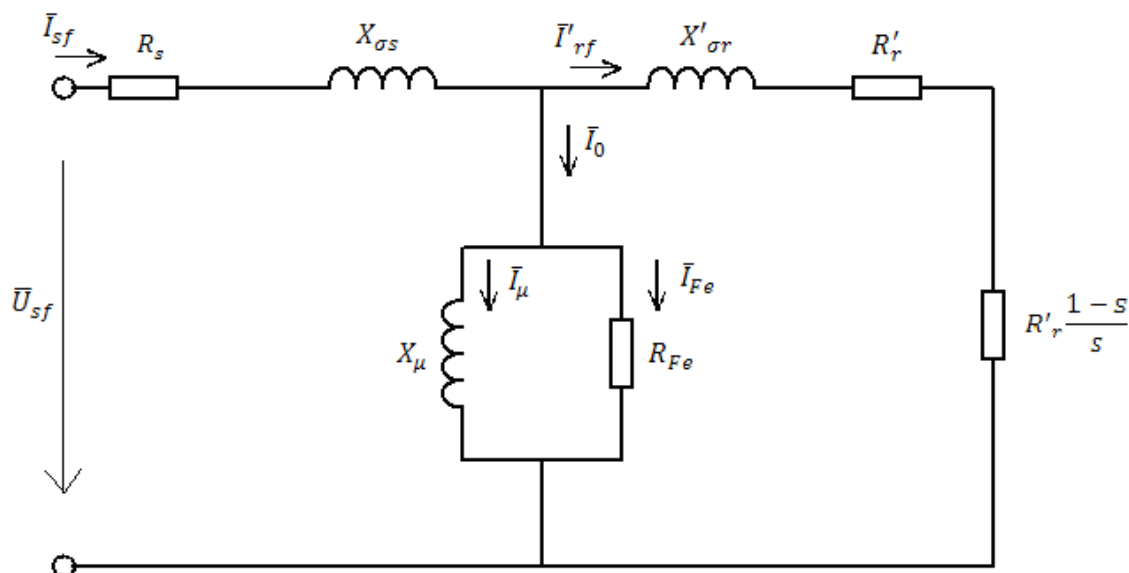


Obr 3.4 Momentová charakteristika stroje

Tab 3.4 Maximálního momentu

$N_{\max}$ (Nm)
36,1

### 3.5 Náhradní schéma as. motoru



Obr 3.5 Náhradní schéma asynchronního motoru

Hodnoty jednotlivých prvků určíme z měření naprázdno a nakrátko. Podélnou větev náhradního schématu reprezentuje satorové vinutí  $R_s$ , rozptylová reaktance satoru  $X_{\sigma s}$ , rozptylovou reaktanci rotoru  $X'_{\sigma r}$  a odpor rotoru  $R'_r$ . Zátěž představuje  $R'_r \frac{1-s}{s}$ . Příčnou větev reprezentuje rozptylová reaktance  $X_\mu$  a odpor  $R_{Fe}$ , který představuje ztráty v železe.

### 3.6 Prvky náhradního schématu a jejich výpočet

Štítkové hodnoty motoru Siemens:

zapojení do Y

$$U_1 = 400 \text{ V}$$

$$I_N = 4,90 \text{ A}$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz}$$

$$P_1 = 2,2 \text{ kW}$$

$$\cos\varphi_0 = 0,81$$

$$n_N = 1425 \text{ min}^{-1}$$

Magnetizační proud, z naměřených hodnot naprázdno při jmenovitém napětí

$$I_\mu = I_{0N} \sin\varphi_{0N} = 3,365 \cdot 0,994 = 3,345 \text{ A} \quad (3.8)$$

$$\sin\varphi_{0N} = \sqrt{1 - \cos\varphi_{0N}^2} = \sqrt{1 - 0,109^2} = 0,994 \quad (3.9)$$

Proud v železe (ztrátový proud)

$$I_{Fe} = I_{0N} \cos\varphi_{0N} = 3,365 \cdot 0,109 = 0,367 \text{ A} \quad (3.10)$$

Moment pro pokrytí vlastních ztrát ve stavu naprázdno

$$M_{ztrát} = \frac{\Delta P_{0N}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{58}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60}} = 0,369 \text{ Nm} \quad (3.11)$$

Magnetizační reaktance  $X_\mu$

$$X_\mu = \frac{U_{fN}}{I_\mu} = \frac{231}{3,045} = 69,06 \, \Omega \quad (3.12)$$

Magnetizační indukčnost  $L_\mu$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi f_s} = \frac{69,06}{2\pi \cdot 50} = 0,22 \text{ H} \quad (3.13)$$

Ztráty v železe

$$R_{Fe} = \frac{U_{fN}}{I_{Fe}} = \frac{231}{0,367} = 627,42 \, \Omega \quad (3.14)$$

Statorový odpor

$$R_s = 3,35 \, \Omega \quad (3.15)$$

Jmenovitý proud nakrátko

$$I_{kN} = I_k \frac{U_N}{U_k} = 4,9 \frac{400}{87,71} = 22,346 \, \text{A} \quad (3.16)$$

Celkový činný odpor

$$R_k = \frac{U_{sfn} \cdot \cos \varphi_k}{I_{kN}} = \frac{231 \cdot 0,536}{22,346} = 5,54 \, \Omega \quad (3.17)$$

Odpor rotorového vinutí přepočítaný na stator

$$R'_r = R_k - R_s = 5,54 - 3,35 = 1,1 \, \Omega \quad (3.18)$$

Celková rozptylová reaktance (součet rozptylové reaktance statoru a rozptylové reaktance přepočítané na stator)

$$X_\sigma = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r} = \sqrt{\left(\frac{U_{fN}}{I_{kN}}\right)^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{231}{22,346}\right)^2 - 1^2} = 10,28 \, \Omega \quad (3.19)$$

$$X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = \frac{X_\sigma}{2} = \frac{10,28}{2} = 5,14 \, \Omega \quad (3.20)$$

Rozptylová indukčnost

$$L_\sigma = \frac{X_\sigma}{2\pi f_s} = \frac{10,28}{2\pi \cdot 50} = 0,0327 \, \text{H} \quad (3.21)$$

$$L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = \frac{L_\sigma}{2} = \frac{0,0327}{2} = 0,0164 \, \text{H} \quad (3.22)$$

Jmenovitá impedance

$$Z_N = \frac{U_{fN}}{I_{fN}} = \frac{231}{4,9} = 47,14 \, \Omega \quad (3.23)$$

Celková reaktance

$$X_C = \frac{U_{1f}}{I_0} = \frac{231}{3,365} = 68,65 \, \Omega \quad (3.24)$$

Jmenovitý moment

$$M_N = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_n}{60}} = \frac{2200}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1425}{60}} = 17,74 \, \text{Nm} \quad (3.25)$$

Jmenovitý příkon

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 4,9 = 3394,82 \text{ VA} \quad (3.26)$$

Rozběhová doba motoru:

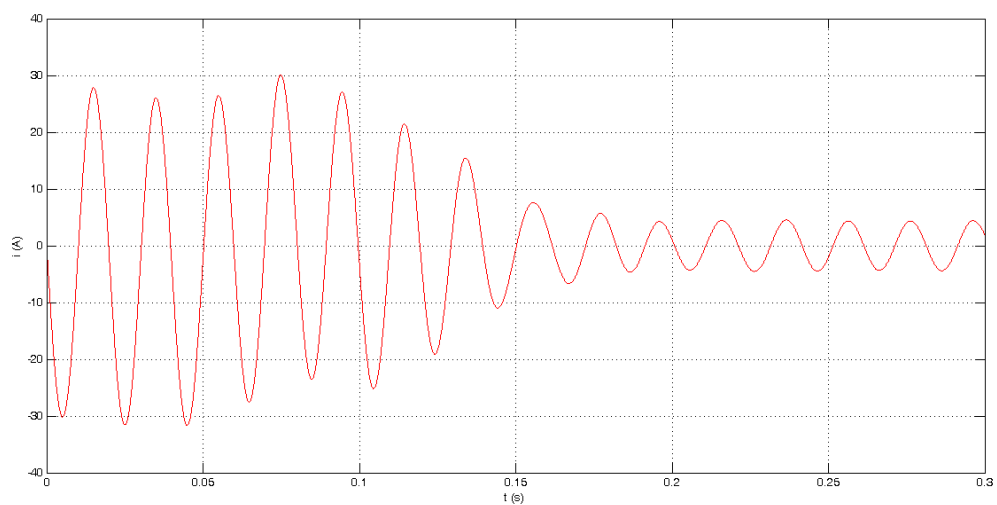
$$t_a = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{M_N} = 0,01918 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{1425}{17,74} = 0,161 \text{ s} \quad (3.27)$$



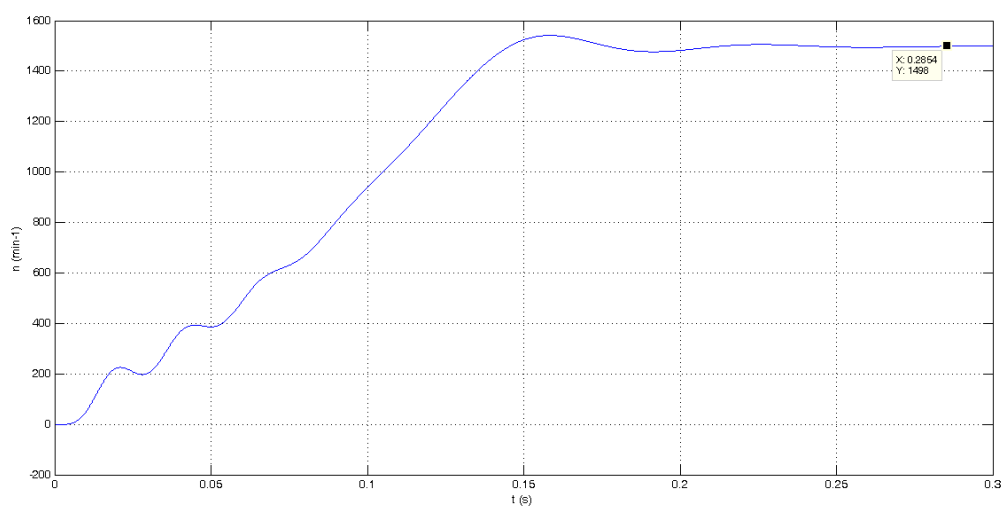


## 4.1 Připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení

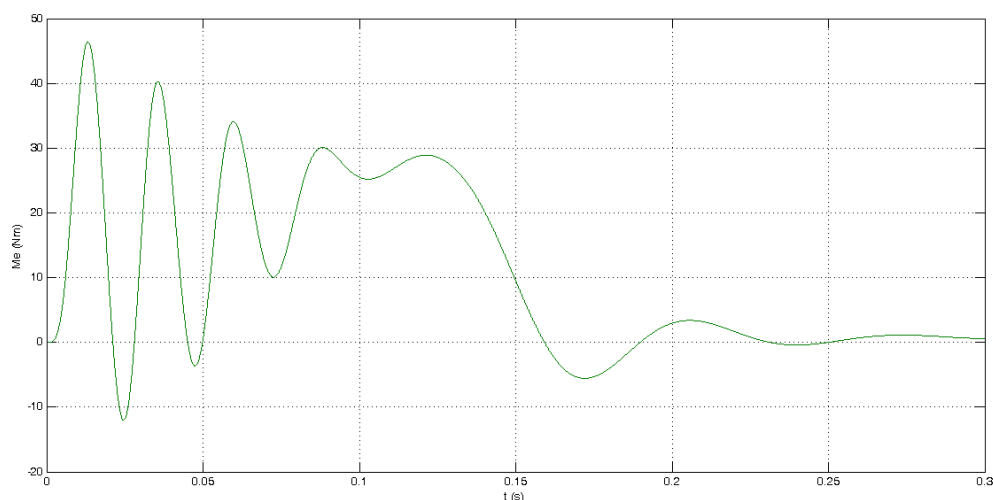
### 4.1.1 Spouštění při jmenovitém napětí $U_N$



Obr 4.1 průběh statorového proudu při připojení stroje na  $U_N$



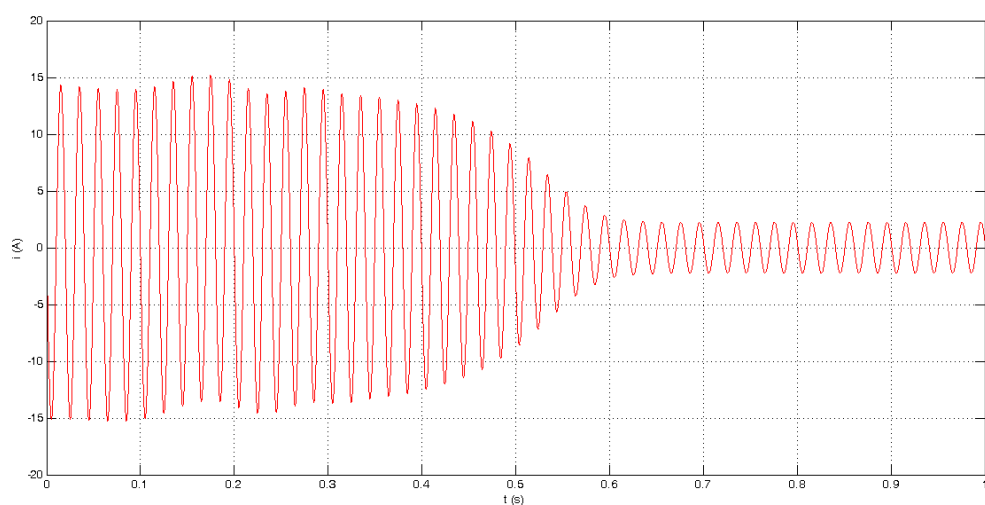
Obr 4.2 průběh otáček při připojení stroje na  $U_N$



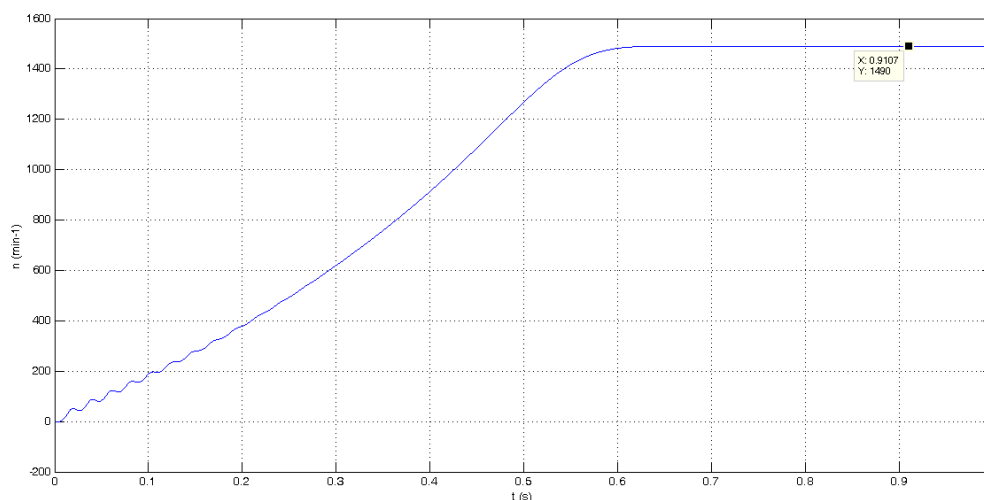
Obr 4.3 průběh momentu při připojení stroje na  $U_N$

Charakteristiky zapínání při jmenovitém napětí  $U_N$ . Na obrázku 4.1 je vynesena proudová charakteristika jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 4,2 ms záběrný proud 21,21 A a doba trvání ustálení proudu je 0,19 s a hodnota ustáleného proudu je 3,2 A. Na obrázku 4.2 je narůst otáček do doby 75 ms doprovázen nepatrnými překmity, ale v čase 0,286 s dochází k ustálení otáček na hodnotě 1498 [min-1]. Na obrázku 4.3 je vynesena momentová charakteristika, na začátku dochází ke kmitání momentu až do záporných hodnot. Záběrný moment je v čase 14ms a jeho hodnota je 46,5 Nm, což je zhruba 3x větší než jmenovitý moment  $M_N$ . Moment naprázdno je 0,52 A stroj dosahuje momentu zvratu 28,88 Nm.

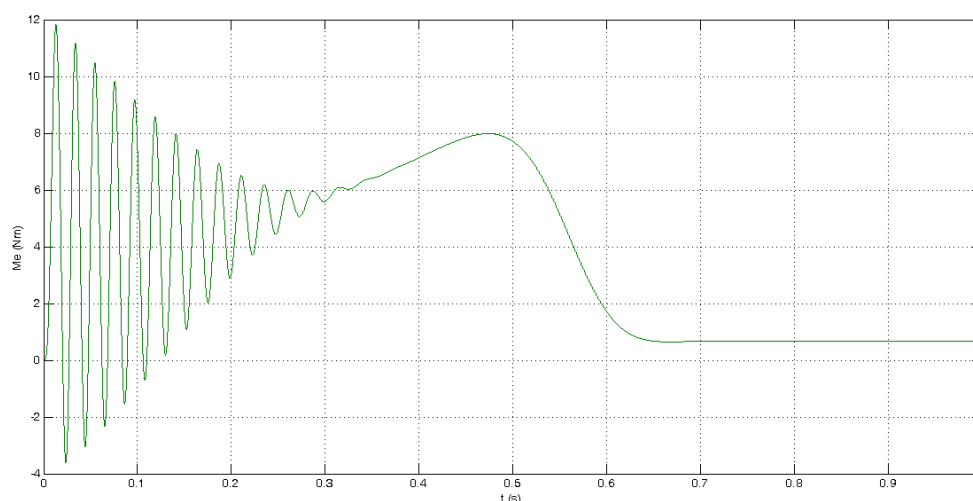
#### 4.1.2 Spouštění s polovičním jmenovitým napětí $U_N$



Obr 4.4 průběh statorového proudu při připojení stroje pro  $1/2 U_N$



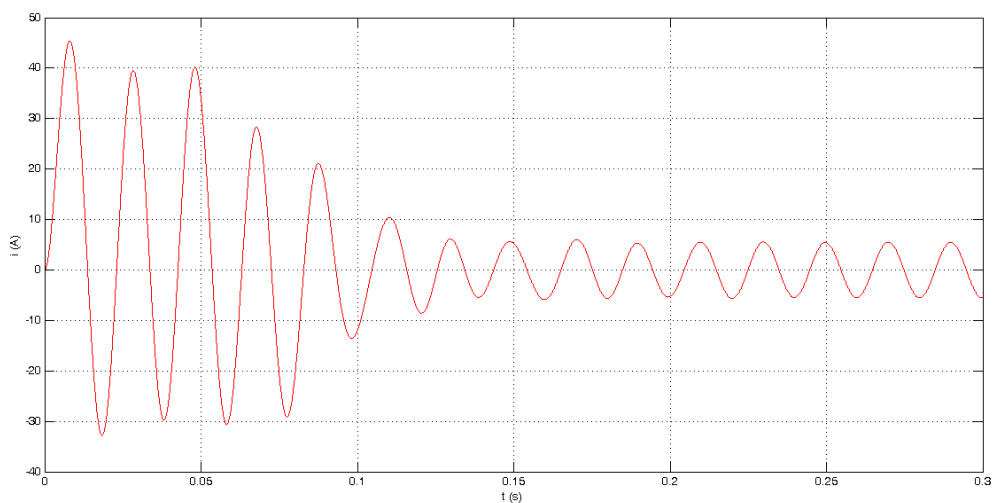
Obr. 4.5 průběh otáček při připojení stroje při  $1/2 U_N$



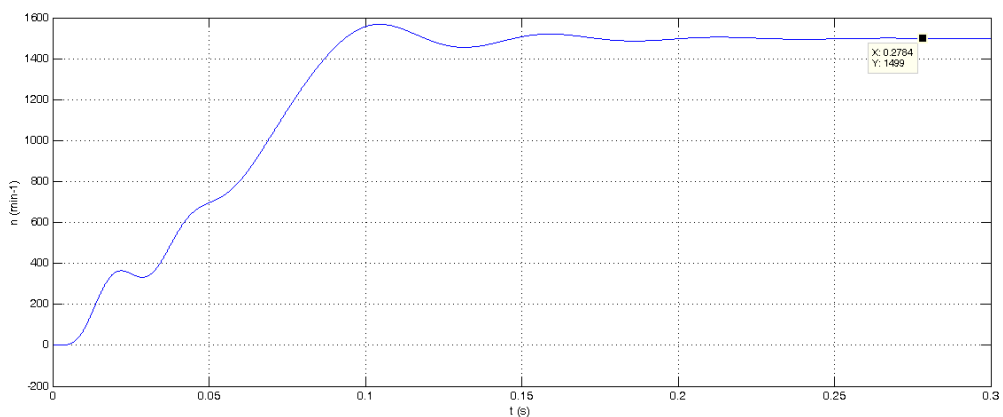
Obr. 4.6 průběh momentu při připojení stroje při  $1/2 U_N$

Charakteristiky zapínání při polovičním jmenovitým napětí  $U_N$ . Na obrázku 4.4 je vnesená proudová charakteristika jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 4,2 ms záběrný proud 10,6 A a doba trvání ustálení proudu je 0,62 s a hodnota ustáleného proudu je 1,6 A. Na obrázku 4.5 se sníženým napětím otáčky rostou pomaleji. Narůst otáček do doby 0,22 s je doprovázen nepravidelnými kmity, ale v čase 0,91s dochází k ustálení otáček na hodnotě 1490 [min<sup>-1</sup>]. Na obrázku 4.6 je vynesena momentová charakteristika. Na začátku dochází ke kmitání momentu až do záporných hodnot a četnost kmitání při sníženém napětí je větší než při jmenovitém. Záběrný moment je také výrazně nižší a je v čase 14 ms a jeho hodnota je 11,8 Nm. Moment naprázdno 0,5 Nm. A stroj dosahuje momentu zvratu 6,42 Nm.

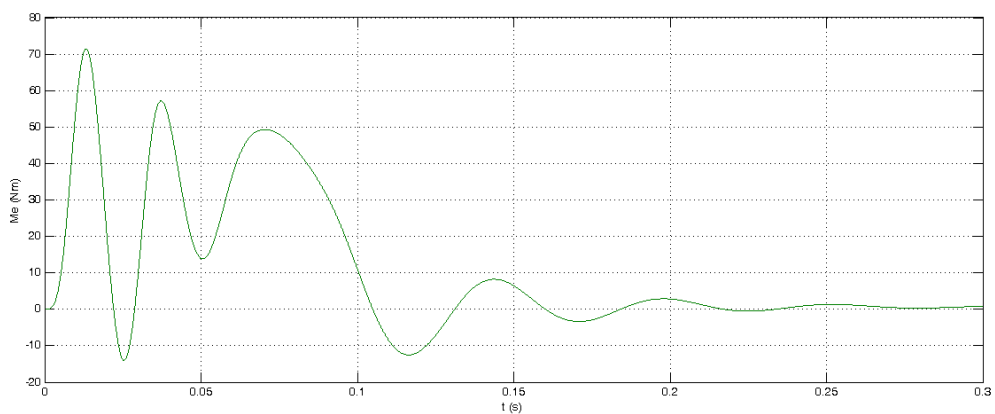
### 4.1.3 Spouštění při $1,25 U_N$



Obr 4.7 průběh satorového proudu při připojení stroje při  $1,25 U_N$



Obr 4.8 průběh otáček při připojení stroje při  $1,25 U_N$



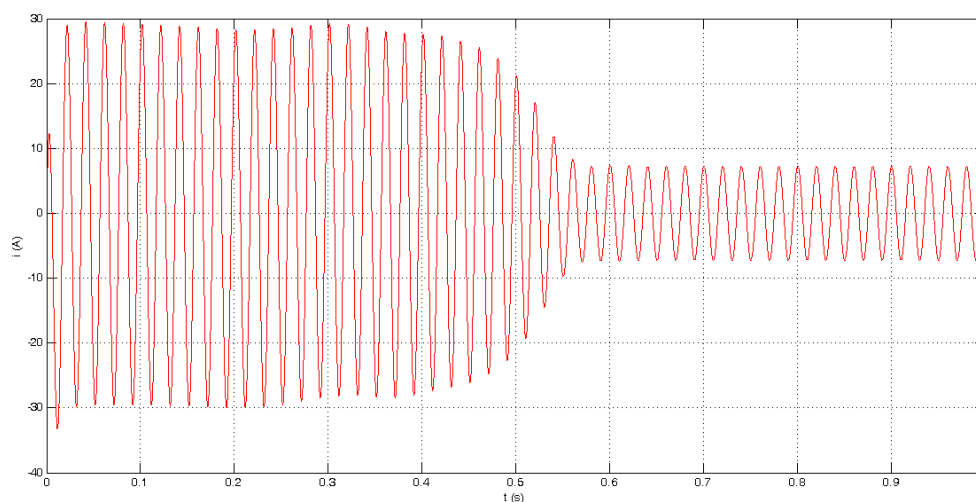
Obr 4.9 průběh momentu při připojení stroje při  $1,25 U_N$

Charakteristiky zapínání při  $1,25 U_N$ . Na obrázku 4.7 je vynesena proudová charakteristika jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 4,2 ms záběrný proud 31,92 A, ale v čase 0,125 s jsou rázové proudy ukončeny a proud se ustálil na hodnotě 3,46 A.

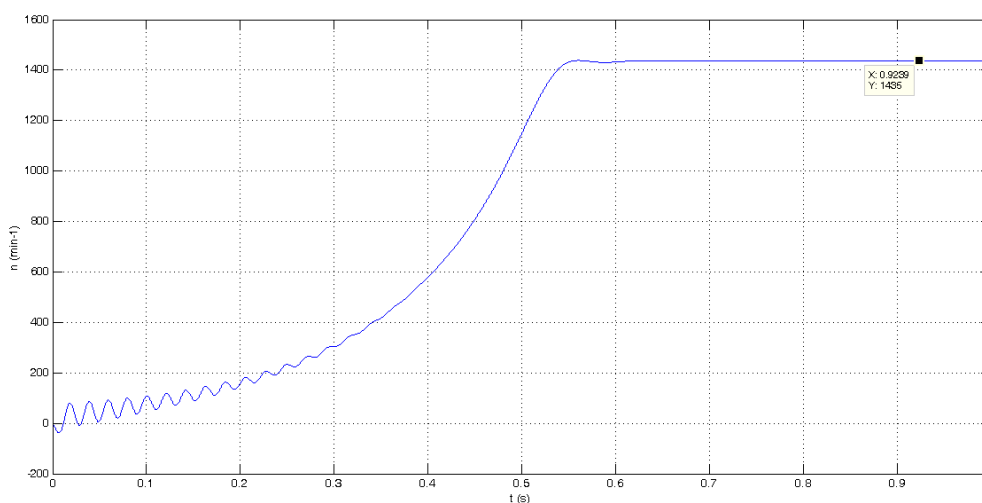
Na obrázku 4.8 je patrné, že nárůst rychlostí je rychlý. K ustálení otáček dochází v čase 0,279 s na hodnotě 1499 [min-1]. Na obrázku 4.9 je záběrný moment dosahuje v čase 14 ms hodnoty 71,8 Nm, poté dochází k rychlému ustálení. Moment naprázdno 0,5 Nm. A stroj dosahuje momentu zvratu 45,7 Nm

## 4.2 Připojení asynchronního motoru do sítě do plného zatížení

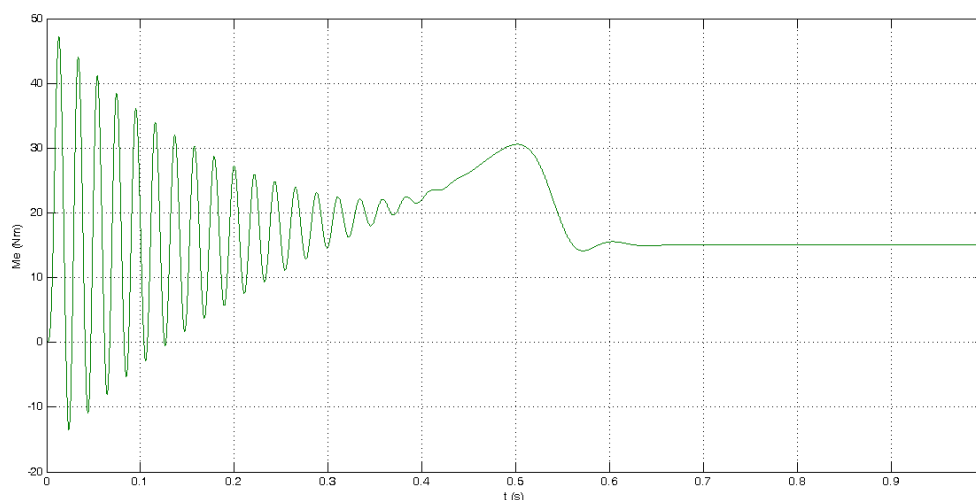
### 4.2.1 Spouštění při jmenovitém napětí $U_N$



Obr 4.10 průběh satorového proudu při připojení stroje na  $U_N$



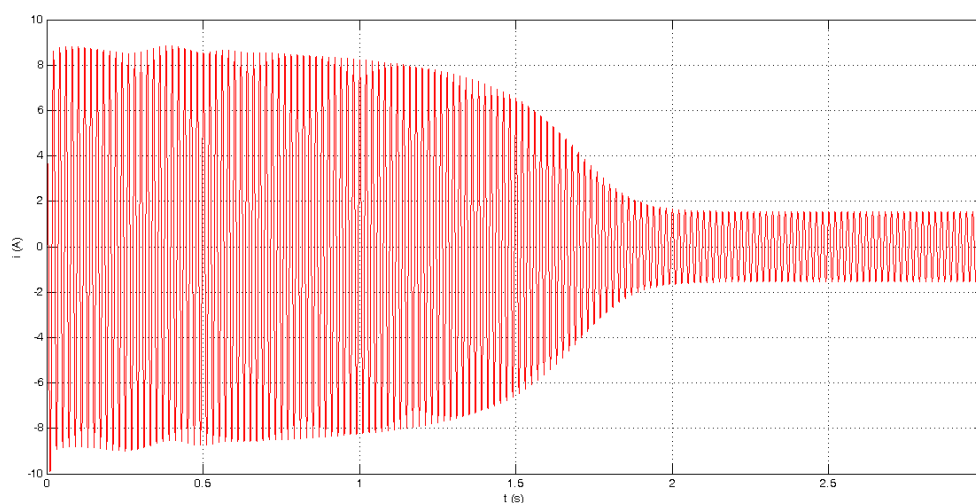
Obr 4.11 průběh otáček při připojení stroje na  $U_N$



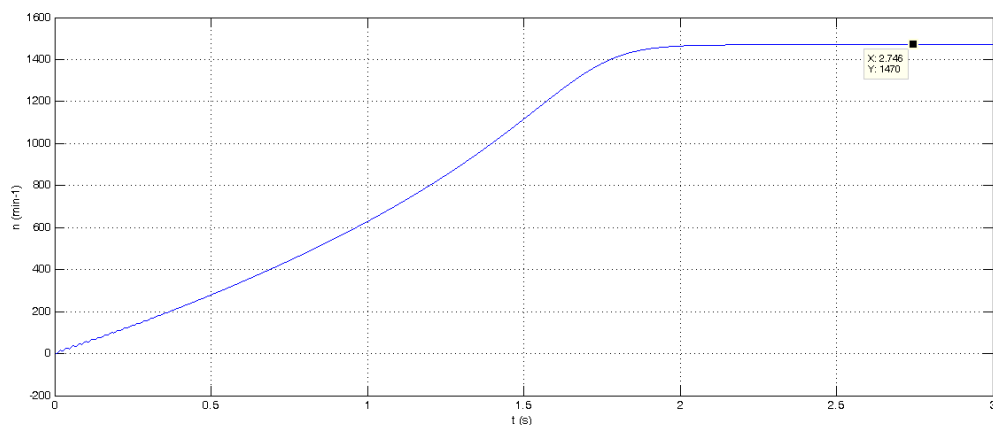
Obr 4.12 průběh momentu při připojení stroje na  $U_N$

Na obrázku 4.10 je vynesena proudová charakteristika jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 4,2 ms záběrný proud 23,69 A a doba trvání ustálení proudu je 0,57 s a hodnota ustáleného proudu je 5 A. Na obrázku 4.11 je narůst otáček doprovázen nepatrnými překmity, které v prvním pulzu dosahují záporné hodnoty. K ustálení otáček dochází v čase 0,924 s na hodnotě 1435 [min-1]. Na obrázku 4.12 je vynesena momentová charakteristika, na začátku dochází ke kmitání momentu až do záporných hodnot. Záběrný moment je v čase 14ms a jeho hodnota je 47,4 Nm, což je zhruba 3x větší než jmenovitý moment  $M_N$ . A stroj dosahuje momentu zvratu 23,33 Nm. V čase 0,65 s dochází k ustálení momentu na hodnotě 15,1 Nm.

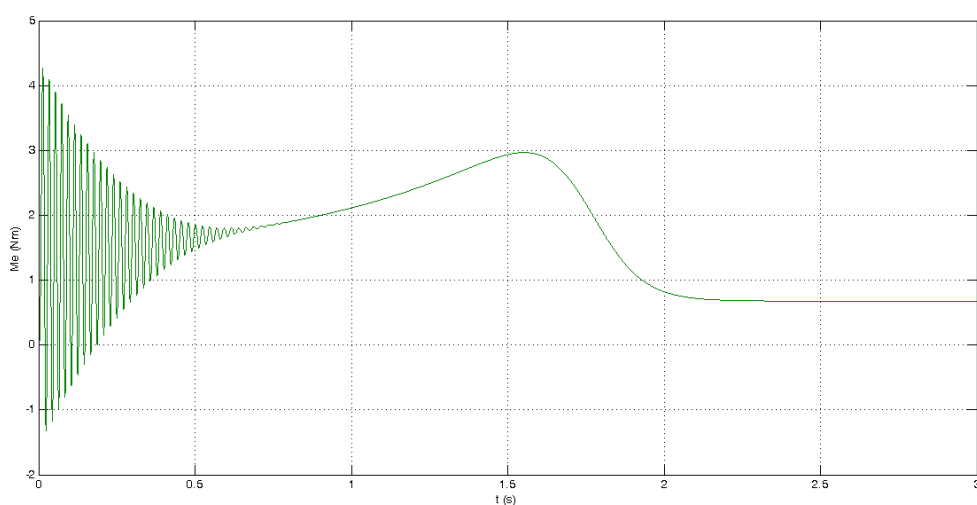
#### 4.2.2 Spouštění při 120 V



Obr 4.13 průběh statorového proudu při připojení stroje na 120 V



Obr 4.14 průběh otáček při připojení stroje na 120 V



Obr 4.15 průběh momentu při připojení stroje na 120 V

Spouštění při 120 V je nejnižší napětí, se kterým se motor ještě rozběhne. Na obrázku 4.13 je vnesená proudová charakteristika jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 1,5 ms záběrný proud 7 A a doba trvání ustálení proudu je 2 s a hodnota ustáleného proudu je 1,15 A. Na obrázku 4.14 při napětí 120 V se motor velice pomalu roztáčí. V čase 2,746 s dochází k ustálení otáček na hodnotě 1470  $[\text{min}^{-1}]$ . Na obrázku 4.15 je vynesena momentová charakteristika. Na začátku dochází ke kmitání momentu až do záporných hodnot. Záběrný moment je také výrazně nižší a je v čase 14 ms a jeho hodnota je 4,3 Nm. A stroj dosahuje momentu zvratu 1,85 Nm. V čase 2,3 s dochází k ustálení momentu na hodnotě 0,67 Nm.



### 4.3 Vyhodnocení simulace

#### 4.3.1 Vyhodnocení přechodných děju připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení

K vyhodnocení přechodných dějů, je možné sestavit tabulku.

Tab 4.1 porovnání výsledku simulace stroje bez zátěže

	$I_K$	$t_a$	$I_0$	$T_{ep}$	$T_{e0}$	$T_{emax}$	$n$
$U_N$	21,21	0,19	3,2	46,5	0,52	28,88	1498
$1/2 U_N$	10,6	0,62	1,6	11,8	0,5	6,42	1490
$1,25 U_N$	31,92	0,125	3,85	71,8	0,51	45,7	1499

Posouzení záběrného proudu  $I_K$ . V simulaci při připojování stroje na  $U_N$  byl změřen záběrný proud 21,21 A. Při napájení  $1/2 U_N$  poklesl záběrný proud na 10,6 A, což je přesně o polovinu menší proud než při napájení  $U_N$ . Při  $1,25 U_N$  byl záběrný proud největší a jeho hodnota byla 31,92 A což je o 50% více než při napájení  $U_N$ .

Z hlediska posuzování doby rozběhu stroje  $t_a$ . Při napájení  $1/2 U_N$  je doba rozběhu 3,25x delší než při rozběhu při  $U_N$ . Doba rozběhu při napájení  $1,25 U_N$  je nepatrně menší než při  $U_N$ , rozdíl je 65 ms.

Posuzování ustálené hodnoty proudu  $I_0$ . Při napájení  $1,25 U_N$  je hodnota ustáleného proudu o 20% větší než hodnota při  $U_N$ . Ale u napájení  $1/2 U_N$  je proud 2x menší než při  $U_N$ .

Posouzení maximálního elektromagnetického momentu  $T_{ep}$ . Ve stavu naprázdno při  $U_N$  je maximální elektromagnetický moment 4x větší než při  $1/2 U_N$ . Tím je potvrzeno, že moment se snižuje s kvadrátem napětí. A při  $1,25 U_N$  je moment 1,5x větší než při  $U_N$ .

Posouzení elektromagnetického momentu naprázdno  $T_{e0}$ . Ve všech tří případech jsou hodnoty přibližně stejné.

Posouzení elektromagnetického momentu zvratu  $T_{emax}$ . Při jmenovitém napětí je moment zvratu 28,88 Nm a moment zvratu při  $1/2 U_N$  je 6,42, který je 4,5x menší než při  $U_N$ . Při  $1,25 U_N$  se moment zvratu dostal až na hodnotu 45,7 Nm. Znova se potvrdilo, že moment se snižuje s kvadrátem napětí.

Posouzení rychlosti stroje  $n$ . Velikost napájecího napětí ve stavu naprázdno velice mírně ovlivňuje velikost otáček.

#### 4.3.2 Vyhodnocení přechodných dějů připojení asynchronního stroje do sítě se zatížením

K vyhodnocování přechodných dějů se opět zavádí tabulka.

Tab 4.2 porovnání výsledku simulace stroje se zátěží

	$I_K$	$t_a$	$I_0$	$T_{eP}$	$T_{e0}$	$T_{e\max}$	$n$
$U_N$	23,69	0,57	5	47,4	15,1	23,33	1435
$1/2 U_N$	7	2	1,15	4,3	0,67	1,85	1470

Posouzení záběrného proudu  $I_K$ . V simulaci při připojování stroje na  $U_N$  byl změřen záběrný proud 21,21 A. Při napájení 120 V poklesl záběrný proud na 7 A, takže při napájení 120 V je záběrný proud 3,4x menší.

Z hlediska posuzování doby rozběhu stroje  $t_a$ . Při  $U_N$  je doba rozběhu 3,5x kratší než doba rozběhu při 120 V.

Posuzování ustálené hodnoty proudu  $I_0$ . Při  $U_N$  je proud 4,3x větší než při 120 V

Posouzení maximálního elektromagnetického momentu  $T_{ep}$ . V zatížení při  $U_N$  je maximální elektromagnetický moment 11x větší než při napájení 120 V. Tím je potvrzeno, že moment se snižuje s kvadrátem napětí.

Posouzení elektromagnetického momentu  $T_{ez}$ . Momenty jsou velice odlišné.

Posouzení elektromagnetického momentu zvratu  $T_{e\max}$ . Při jmenovitém napětí je moment zvratu 23,33 Nm a moment zvratu při 120 V je 1,85 Nm. Znova se potvrdilo, že moment se snižuje s kvadrátem napětí.

#### 4.3.3 Porovnání simulovaných přechodných dějů při stavu naprázdno a v zatížení

Dá se říct, že došlo k prokázání faktu, velikost zatěžovacího momentu nemá vliv na velikost záběrného proudu, ale má vliv na dobu rozběhu motoru. Při jmenovitém napětí zatížený motor rozbíhal 3x déle než motor naprázdno. Velikosti rázových momentu, vznikající při spouštění nemají vliv na zatížení.

## 5 Měření přechodných dějů

Měření bylo provedeno na asynchronním stroji, který se podobá stroji, který byl použit pro modelování a simulování. Zapojení stroje bylo YY s jmenovitou rychlostí  $n_n$  1425 [min<sup>-1</sup>]. Asynchronní stroj je pevně spojen s dynamometrem a celý stroj se snímá pomocí čidla, které je přes měřicí terminál spojen s měřicí PC sestavou. Průběhy statorových proudů, které jsou vyneseny v grafech, jejichž hodnoty jsou maximální nikoliv efektivní. V textech se uvádí efektivní hodnoty.



Obr 5.1 Asynchronní motor s PC sestavou, kde byly měřené přechodné děje

Použité přístroje:

Asynchronní motor Siemens (3-f motor : 1LE10021AB422AB0)

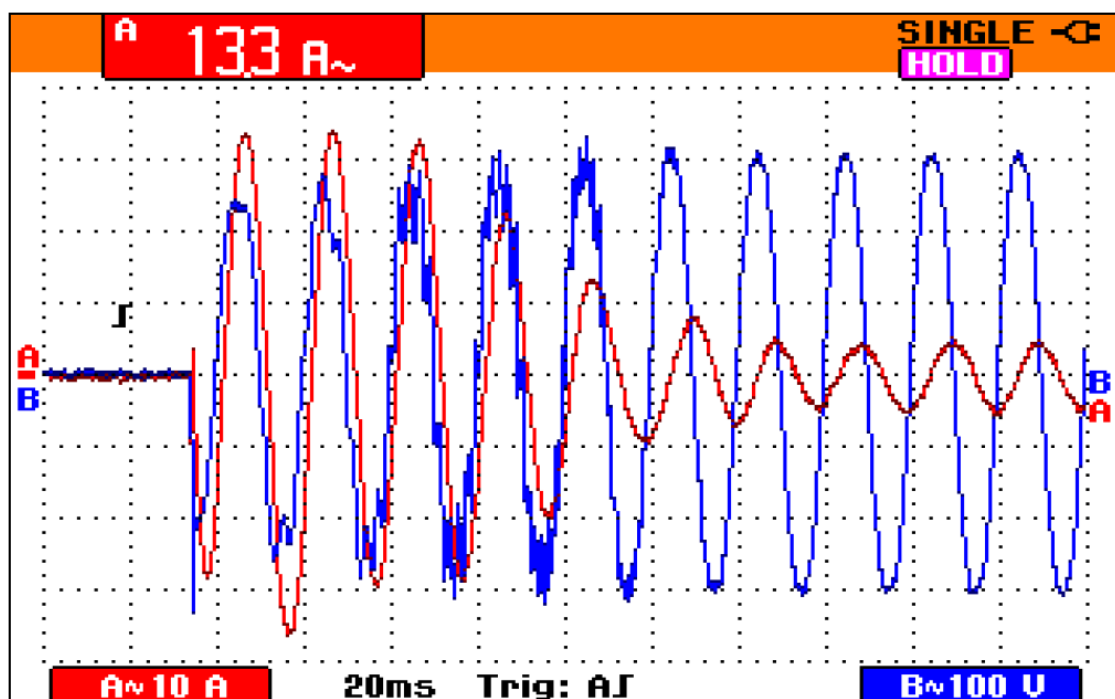
PC s měřicí sestavou MAGTROL

Měřicí sonda

Osciloskop – FLUKE 199C

## 5.1 Připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení

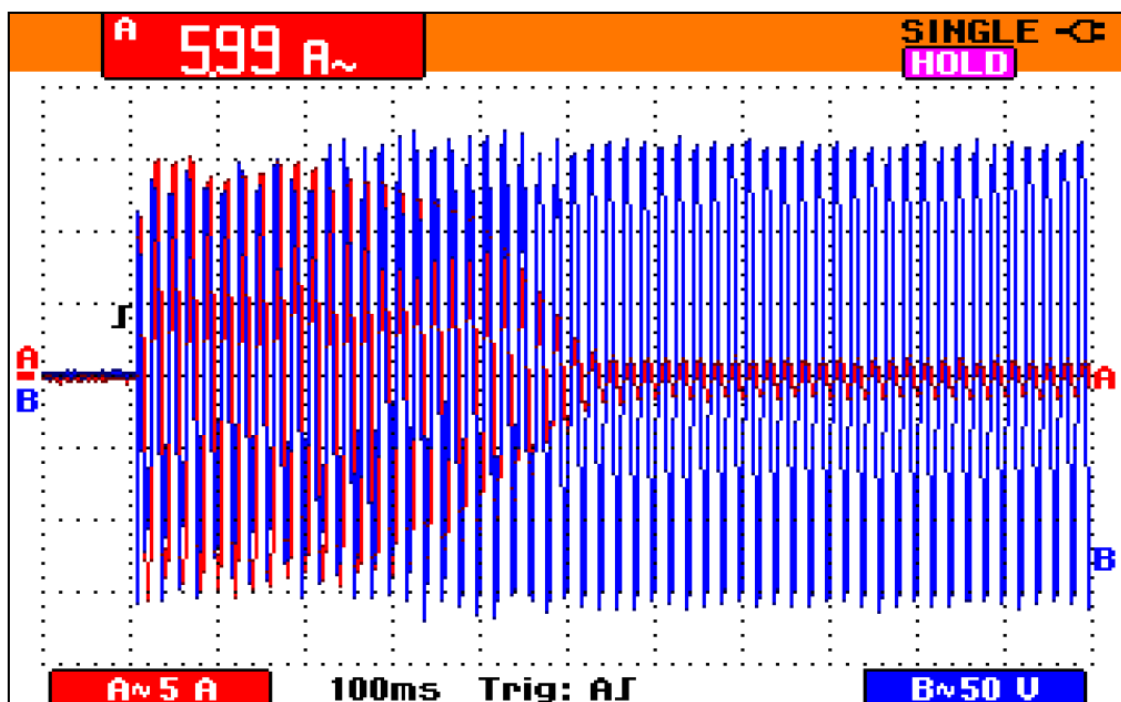
### 5.1.1 Spouštění při jmenovitém napětí $U_N$



Obr 5.2

Z obrázku 5.2 je patrné, že zapnutí motoru přišlo v čase 34,16 ms a v čase 37,86 ms protékal záběrný proud 23,86 A. Ustálení proudu nastalo v čase 168,72 ms a hodnota ustáleného proudu je 3,34 A.

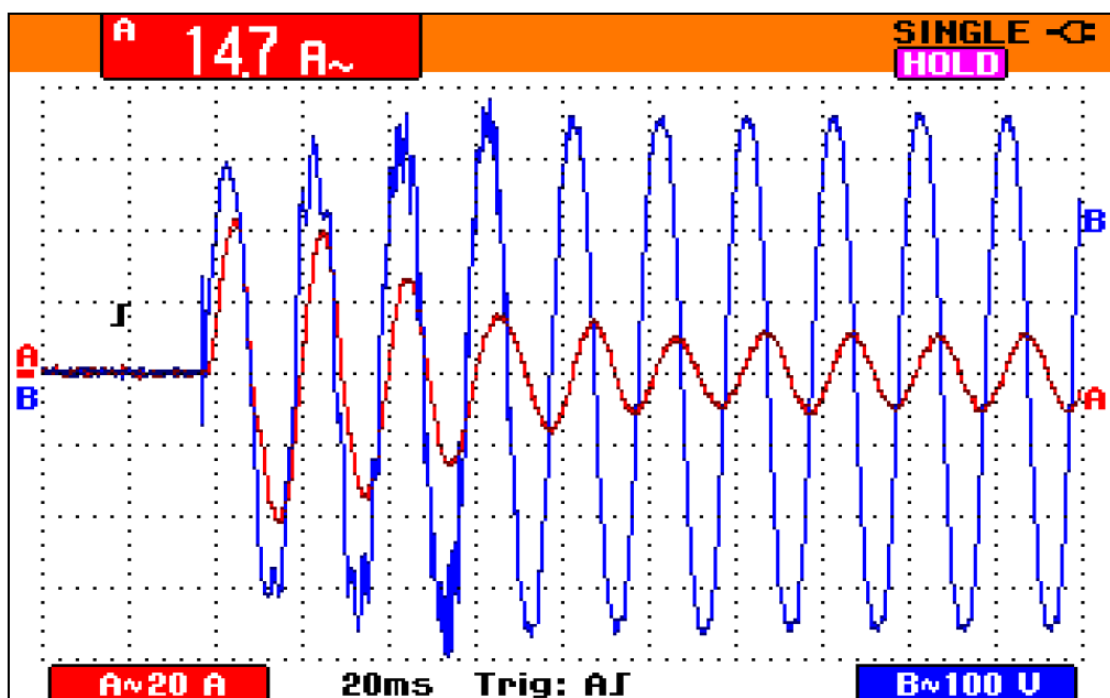
### 5.1.2 Spouštění při polovičním jmenovitém napětí $U_N$



Obr 5.3

Z obrázku 5.3 je patrné, že zapnutí motoru přišlo v čase 101,76 ms a v čase 111,76 ms protékal záběrný proud 10,64 A. Ustálení proudu nastalo v čase 688,23 ms a hodnota ustáleného proudu je 0,95 A.

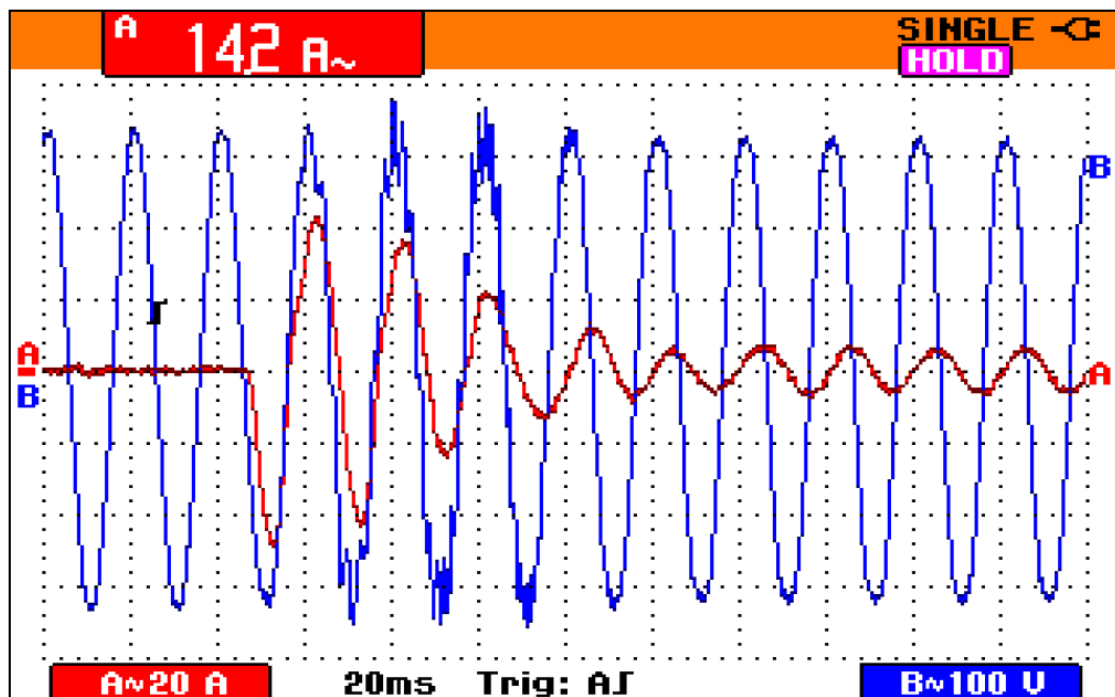
### 5.1.3 Spouštění při 500V



Obr 5.4

Na obrázku 5.4, došlo k zapnutí v čase 38 ms a v čase 45,5 ms protékal záběrný proud 29,89 A. Ustálení proudu nastalo v čase 141,45 ms a hodnota ustáleného proudu je 8,22 A.

#### 5.1.4 Spouštění při jmenovitém napětí $U_N$ (ve fázi)

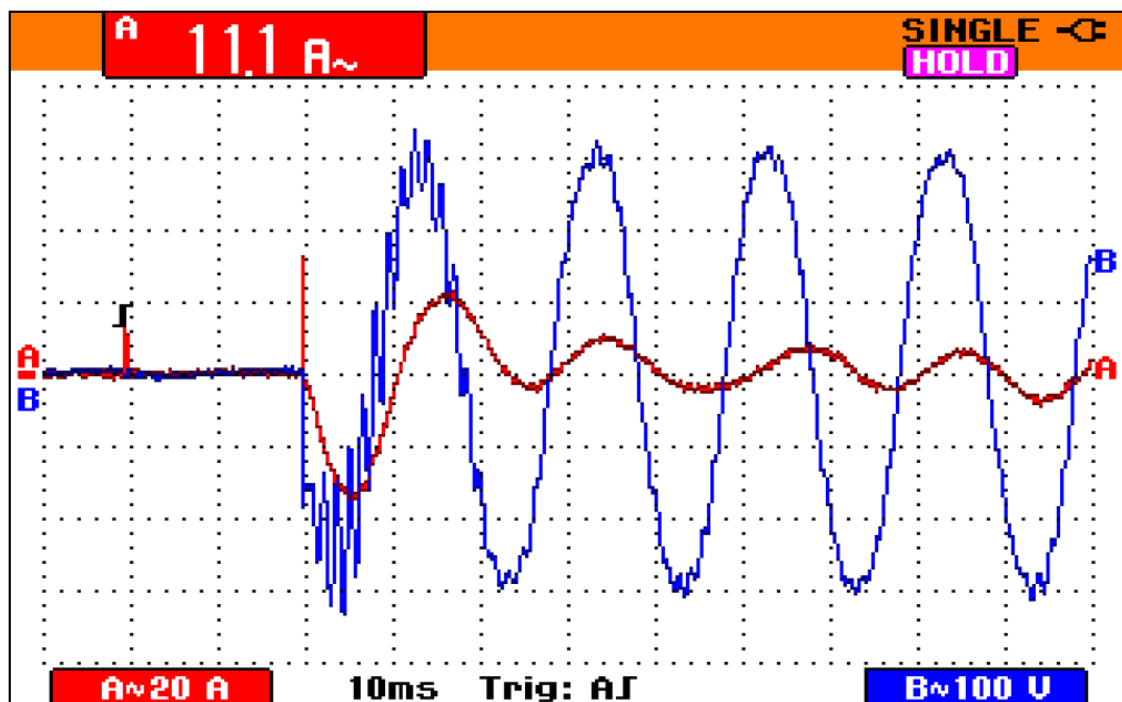


Obr 5.5

Na obr 5.5 je spouštění motoru při jmenovitém napětí. Při spuštění je napětí a proud ve fázi. Zapnutí přišlo v čase 46,5 ms a v čase 52,9 ms je hodnota záběrného proudu je 34 A. Ale v čase 226,5 ms se proud zpožďuje za napětím o úhel  $90^\circ$ , to znamená, že motor naprázdno má induktivní charakter.

## 5.2 Připojení asynchronního motoru do sítě do plného zatížení

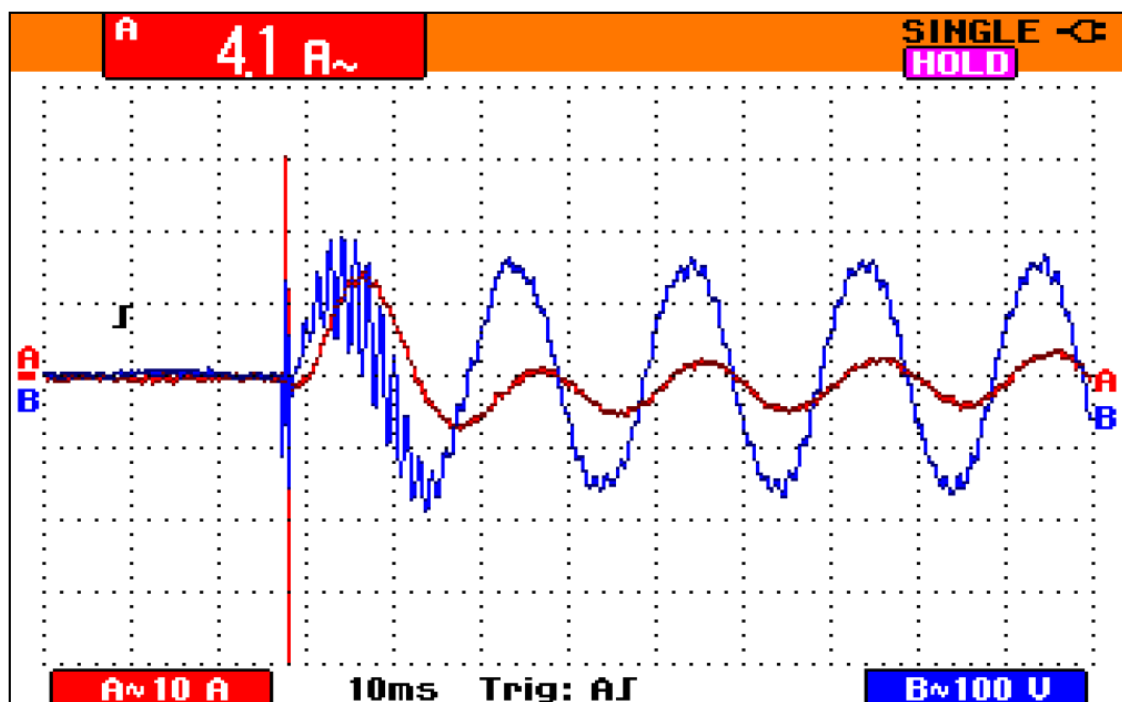
### 5.2.1 Spouštění při jmenovitém napětí $U_N$



Obr 5.6

Na obrázku 5.6 došlo k zapnutí v čase 30 ms a v čase 35,3 ms protékal záběrný proud 24,92 A. Ustálení proudu nastalo v čase 81,23 ms a hodnota ustáleného proudu je 5 A.

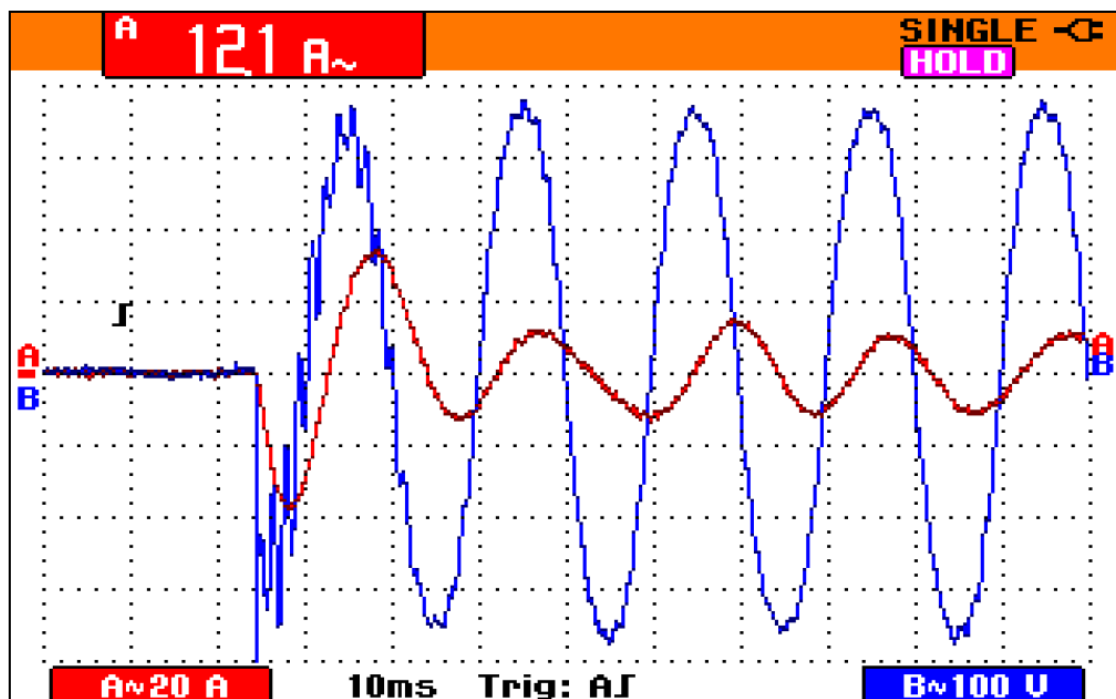
### 5.2.2 Spouštění při polovičním jmenovitém napětí $U_N$



Obr 5.7

Na obrázku 5.7 došlo k zapnutí v čase 30 ms a v čase 35,8 ms protékal záběrný proud 11,45 A. Ustálení proudu nastalo v čase 71,8 ms a hodnota ustáleného proudu je 1,75 A.

### 5.2.3 Spouštění při 500V



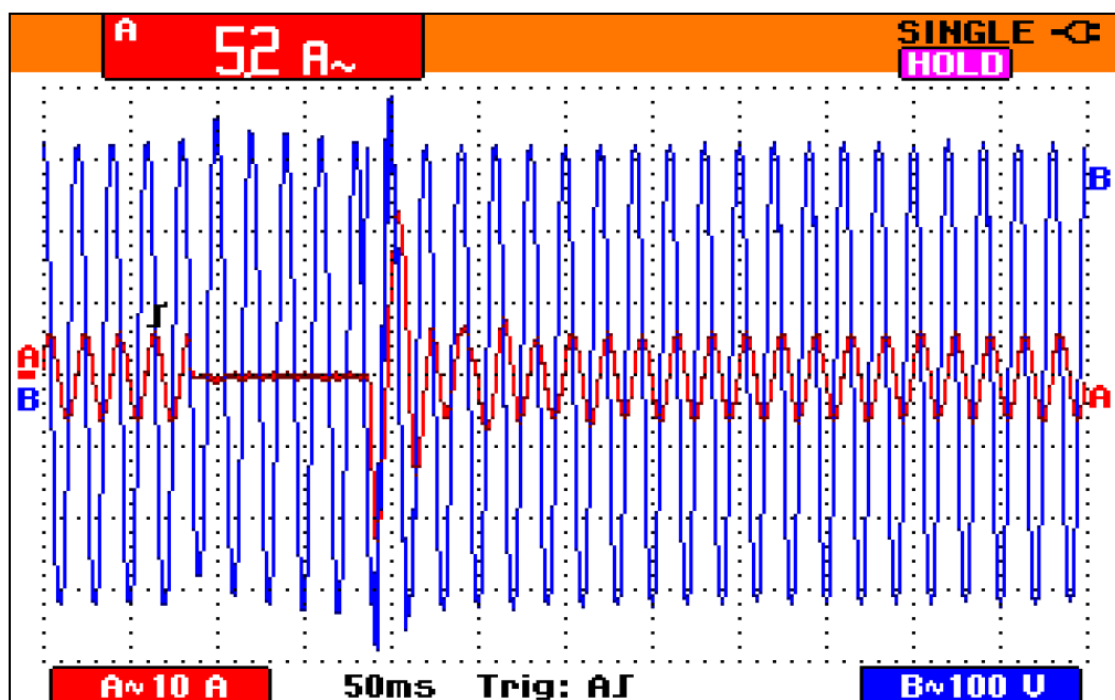
Obr 5.8

Na obrázku 5.8 došlo k zapnutí v čase 24,34 ms a v čase 28,2 ms protékal záběrný proud 26,94 A. Ustálení proudu nastalo v čase 93,33 ms a hodnota ustáleného proudu je 7,46 A.

### 5.2.4 Odpojení a znovu připojení k síti

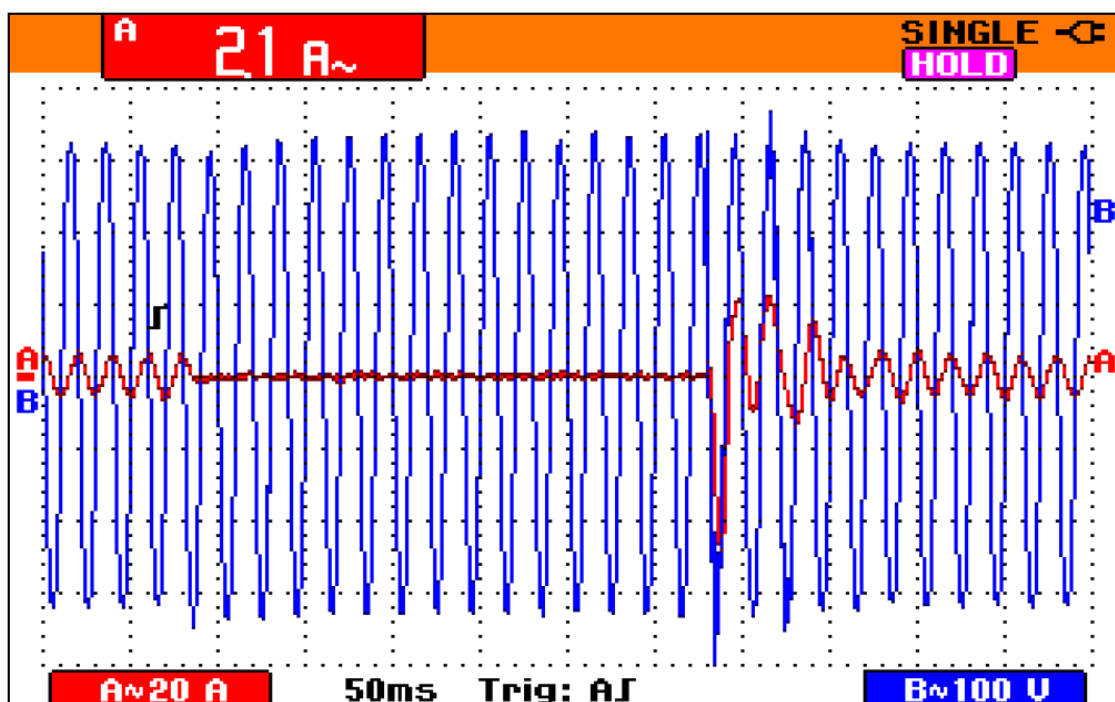
V tomto měření byl stroj ihned po vypnutí od sítě opětovně zapnut. A je zkoumána velikost záběrného proudu a hodnota ustáleného proudu.





Obr 5.9

Z obrázku 5.9 je patrné, že odpojení přišlo v čase 85 ms a připojení přišlo v čase 188,6 ms. Před odpojením měl proud konstantní hodnotu 4,7 A a při odpojení od sítě proud okamžitě klesnul k nuli, ale napětí se zůstalo konstantní na hodnotě  $U_N$ . K připojení stroje k síti došlo k proudovému rázu, který se dostal na hodnotu 16,55 A (připojení bylo doprovázeno malým napěťovým rázem). Proud se znovu ustálil na hodnotě 4,7 A a to po 123 ms.



Obr 5.10

Z obrázku 5.10 je patrné, že jde znovu o odpojení s následujícím připojením k síti, ale s větší pauzou. Odpojení nastalo v čase 87,5 ms, a hodnota ustáleného proudu byla 4,7 A. Připojení nastalo v čase 385 ms a hodnota záběrného proudu je tentokrát 33,87 A, a v čase 475 ms se proud ustálil na hodnotě 4,7 A.

### 5.3 Vyhodnocení měření

Měření bylo realizováno pomocí osciloskopu, kde záznam z osciloskopu je statorový proud a napětí (aritmetické průběhy všech tří fází proudu a napětí). V měření připojování k síti stroje naprázdno závisí velikost proudu na připojovacím napětí, obdobně je to u měření připojování k síti do plného zatížení. U měření vypnutí a opětovného zapnutí je velikost záběrného proudu závislá, na okamžité hodnotě napětí. Čím menší napětí tím větší záběrný proud, ale nejmenší napětí se kterým se motor ještě rozběhne je 120 V.

#### 5.3.1 Vyhodnocení přechodných dějů připojení asynchronního stroje do sítě bez zatížení

K vyhodnocení přechodných dějů, je možné sestavit tabulku.

Tab 5.1 porovnání výsledku měření stroje bez zátěže

	$I_K$	$t_a$	$I_0$
$U_N$	<b>23,86</b>	<b>0,134</b>	<b>3,34</b>
$1/2 U_N$	<b>10,64</b>	<b>0,586</b>	<b>0,95</b>
$1,25 U_N$	<b>29,89</b>	<b>0,103</b>	<b>8,22</b>

V měření při připojování stroje na  $U_N$  byl změřen záběrný proud 23,86 A. Při napájení  $1/2 U_N$  poklesl záběrný na 10,64 A, což je zhruba o polovinu menší záběrný proud než při napájení  $U_N$ . Při  $1,25 U_N$  byl záběrný proud největší a jeho hodnota byla 29,89 A což je o 25% více než při napájení  $U_N$ .

Z hlediska posuzování doby rozběhu stroje  $t_a$ . Při napájení  $1/2 U_N$  je doba rozběhu 4,4x delší než při rozběhu při  $U_N$ . Doba rozběhu při napájení  $1,25 U_N$  je nepatrně menší než při  $U_N$  o to o 31 ms.

Dalším posuzováním je ustálená hodnota proudu. Při napájení  $1,25 U_N$  je hodnota ustáleného proudu 2,5x větší než hodnota při  $U_N$ . Ale u napájení  $1/2 U_N$  je proud 3,5x menší než při  $U_N$ . Čím menší napětí tím je menší hodnota ustáleného proudu a také to platí naopak, zvětšování napětí nad hodnotu  $U_N$ , má za následek zvětšování ustáleného proudu.

### 5.3.2 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení asynchronního stroje do sítě nezátížením

K vyhodnocování přechodných dějů se opět zavádí tabulka.

Tab 5.2 porovnání výsledku měření stroje se zátěží

	$I_K$	$t_a$	$I_0$
$U_N$	24,92	0,051	5
$1/2 U_N$	11,45	0,042	1,75
$1,25 U_N$	26,94	0,069	7,46

V měření při připojování stroje na  $U_N$  byl změřen záběrný proud 24,92 A. Při napájení  $1/2 U_N$  poklesl záběrný na 11,45 A, což je zhruba o polovinu menší proud než při napájení  $U_N$ . Při  $1,25 U_N$  byl záběrný proud největší a jeho hodnota byla 26,94 A což je o 8% více než při napájení  $U_N$ .

Z hlediska posuzování doby rozběhu stroje  $t_a$ . Při napájení  $1/2 U_N$  je doba rozběhu kratší o 9ms než při  $U_N$ . Doba rozběhu při napájení  $1,25 U_N$  je větší než při  $U_N$  o to o 18 ms.

Dalším posuzováním je ustálená hodnota proudu. Při napájení  $1,25 U_N$  je hodnota ustáleného proudu 1,5x větší než hodnota při  $U_N$ . Ale u napájení  $1/2 U_N$  je proud 2,8x menší než při  $U_N$ .

### 5.3.3 Porovnání přechodných dějů při stavu naprázdno a v zatížení

Posuzování rozdílu asynchronního motoru ve stavu naprázdno a v zatíženém stavu není jednoduché, protože zatížení bylo představováno spuštěným dynamometrem. Proudový ráz ve stavu naprázdno je 23,86 A a v zatíženém stavu je 26,94 A, což přibližně odpovídá správným hodnotám. Ale k rozběhu zatíženému elektromotoru nastalo rychleji než ve stavu naprázdno. Což způsobil dynamometr, rotor zatíženého elektromotoru byl v okamžiku připojení unášen pohybem rotoru dynamometru. Hodnoty ustáleného proudu se liší a to je způsobené zatížením motoru.

## 6 Vyhodnocení přechodných děju:

Podrobné vyhodnocení simulovaných přechodných děju, bylo provedeno v kapitole 4. A vyhodnocení měřených přechodných dějů bylo provedeno v kapitole 5. Abych mohl vyhodnotit přechodné děje v asynchronních motorech, porovnám data získané při simulaci a získané při měření. Nejefektivnější bude porovnání získaných hodnot při připojení stroje k síti ve stavu naprázdno, protože obsahuje nejvíce získaných hodnot. Pro přehlednost se výsledky zapíšu do tabulek.

Tab 6.1 Výsledky simulace přechodných děju ve stavu naprázdno

	$I_K$	$t_a$	$I_0$	$T_{eP}$	$T_{e0}$	$T_{emax}$	$n$
$U_N$	21,21	0,19	3,2	46,5	0,52	28,88	1498
$1/2 U_N$	10,6	0,62	1,6	11,8	0,5	6,42	1490
$1,25 U_N$	31,92	0,125	3,85	71,8	0,51	45,7	1499

Tab 6.2 Výsledky měření přechodných děju ve stavu naprázdno

	$I_K$	$t_a$	$I_0$
$U_N$	23,86	0,134	3,34
$1/2 U_N$	10,64	0,586	0,95
$1,25 U_N$	29,89	0,103	8,22

Z tabulek je patrné, že simulovaný záběrný proud  $I_K$  v porovnání s měřenou hodnotou záběrného proudu  $I_K$  jsou téměř totožné (liší se pouze nepatrně). Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben tím, že čidlo měřící soupravy není schopno zaznamenávat rychlé změny veličin. Doby rozběhu motoru, jsou také téměř totožné, liší se pouze nepatrně. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben špatného nastavení napájecího napětí  $U_N$  (nebylo přesně nastaveno 400 V, ale o něco více). Hodnoty ustáleného proudu jsou také téměř totožné. Jestliže budeme uvažovat, že proud naprázdno je z větší části proudem magnetizačním, je možno srovnat tyto proudy naprázdno s proudem magnetizačním (který je počítán v měření naprázdno). Vypočítaná hodnota magnetizačního proudu  $I_\mu$  je 3,345 A. Hodnota magnetizačního proudu  $I_\mu$  je shodná s proudem naprázdno.

Změřené hodnoty při jmenovitém napětí  $U_N$  jsou skoro totožné s nasimulovanými průběhy. Při napětí  $1/2 U_N$  a  $1,25 U_N$  se výsledky měření se simulovanými hodnotami mírně liší. Lze říct, že vynesené charakteristiky měření a charakteristiky ze

simulování nejsou úplně stejné, protože při měření s  $1/2U_N$  a  $1,25U_N$  bylo použito měkkého zdroje (transformátoru), ale v simulaci byl použit tvrdý zdroj.

Jako nejvýznamnější přechodné děje mnou posuzované, vznikají při připojování asynchronního stroje k síti. Výsledky měření velice závisí za jakých podmínek se stroj připojí k síti, ale také závisí na parametrech sítě (zdroje). Z měření je jasné, že spouštění se sníženým nebo zvýšeným napětím není úplně ideální.

Dále můžu říct, že vytvořený simulační model v programu Matlab – Simulink je správný. Což se ukázalo v porovnávání s měřenými hodnotami.

## 7 Závěr

V bakalářské práci je hlavním cílem modelování přechodných dějů v asynchronním motoru. Při vypracování bakalářské práce jsem podrobně studoval princip a funkci asynchronních motorů a hlavně přechodných dějů. Díky odborné literatuře jsem byl schopen danou problematiku zvládnout a využít ji k teoretickému rozboru asynchronních strojů a přechodných dějů.

Dalším cílem bylo provést základní měření odporu vinuti, měření naprázdno a nakrátko. Měření bylo provedeno na tři-fázovém asynchronním motoru Siemens typu 1LE1. Hlavním důvodem bylo spočítat náhradní prvky asynchronního motoru, které jsou důležité pro nastavení matematického modelu vytvořený v Matlab-Simulink. Sestavený model mi pomohl k simulaci vybraných přechodných dějů. Tyto simulované přechodné děje jsem srovnával s přechodnými ději mnou změřenými. Jelikož jsem byl názoru, že výsledky získané pouze měřením nemusí být vždy dostatečným zdrojem dat pro vyhodnocení a rozbor přechodných dějů. Měření prokázalo, že získané data při simulaci jsou pravdivé a vytvořený model asynchronního motoru, by mohl být využit k podrobnému zkoumání stavů, především těch, které jsou těžce měřitelné. Podrobné vyhodnocení přechodných dějů je popsáno v kapitole 6.

Hlavním přínosem bakalářské práce je rozšíření mých znalostí, týkající se měření a simulací přechodných dějů asynchronních motorů, se kterými jsem se dříve, za dobu svého studia nesetkal.

## Seznam použité literatury

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2002, 135 s. ISBN 80-248-0025-x
- [2] HRABOVCOVÁ, Valéria. RAFAJDUS, Pavol. FRANKO, Marek. HUDÁK, Peter. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. Žilinská univerzita v Žilině, 2009, 335 s. ISBN 978-80-8070-924-2
- [3] PETROV, G. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982, 728 s
- [4] BAŠTA, Jan. *Měření na elektrických strojích: 4. Měření na indukčních strojích*. Praha: SNTL, 1962, 309 s
- [5] MATLAB - *User Guide*
- [6] Krause,P.;Wasynczuk,O.- *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, IEEE Press 2002
- [7] Boldea,I.; Nasar,S.A.-*The Induction Machine Handbook*, CRC Press 2001
- [8] BAŠTA Jan, CHLÁDEK Jaroslav, MAYER Imrich, *Teorie elektrických strojů*. Praha SNTL -Nakladatelství technické literatury, 1968. 584 s. ISBN 04-518-68
- [9] KOCMAN Stanislav, *asynchronní stroje*. Ostrava – Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 2010-04-16
- [10] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří JAVŮREK. *Elektrické pohony*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 221 s. ISBN 80-010-2314-1